

Дослідження процесів обробки

УДК 621.9.025.77:615.46:616.728

**С. В. Сохань*, В. В. Возний, В. Г. Сороченко,
О. А. Микищенко**

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

Ефективність алмазного шліфування керамічних куль

Для алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію розглянуто переваги й недоліки ведення процесу з базуванням куль на площині й у канавці V-подібного профілю за кругової подачі куль як за відсутності, так і за наявності їхньої осциляції. Доведено доцільність шліфування куль з базуванням останніх у канавці й круговою подачею за відсутності їхньої осциляції і на певних режимах обробки для збереження плоскої форми алмазного круга або усунення увігнутості його поверхні. Запропоновано підвищити ефективність алмазного шліфування керамічних куль завдяки переходу на ведення процесу зі зміною як схеми базування куль, так і особливостей кругової подачі останніх, та застосування також відповідних режимів обробки.

Ключові слова: керамічні кулі з нітриду кремнію, алмазне шліфування, базування куль для обробки, режими обробки, осциляція куль під час кругової подачі, форма поверхні алмазного круга.

ВСТУП

У багатьох галузях промисловості використовують у значній кількості підшипники кочення, насоси, гідродвигуни та інші механізми, ресурс і надійність роботи яких в основному визначаються працездатністю і якістю виготовлення деталей типу “куля”. Керамічні кулі у високоточних гібридних підшипниках зі сталевими внутрішніми і зовнішніми кільцями [1–4] мають переваги завдяки таким властивостям керамічного матеріалу, як висока твердість, низький коефіцієнт теплового розширення, низька густина і стійкість до високих температур [2]. Вказані властивості не лише зменшують тертя, але й забезпечують вищу (до 80 %) швидкість обертання, ніж у підшипників з металевими тілами кочення, через меншу вібрацію, а низька щільність кераміки знижує енергоспоживання на 15–20 % [3]. Крім того, переважання стискувальних напружень на тілах кочення дозволяє максимально використовувати механічні властивості кераміки [3]. Постійне удосконалення власне

керамічних композиційних матеріалів потребує й неодмінного удосконалення технології алмазної обробки виробів з них [5, 6].

Розвиток технологій механічної обробки керамічних куль до високого ступеня точності й якості стисло висвітлено в [7–9], де основний принцип алмазної обробки куль між дисками залишається незмінним, проте застосовують ряд різновидів методу. З тих пір як ідея V-подібної канавки для базування куль була вперше реалізована у верстаті для шліфування металевих куль для підшипників (Фрідріх Шифер, 1883 [10]) було запропоновано багато варіантів цієї концепції, наприклад, поділ канавки на дві незалежні опорні поверхні [11, 12], використання ексцентриситету між нижнім диском з канавкою й верхнім диском [13, 14] та використання змінного радіуса під час руху кулі [15, 16]. В інших методах шліфування канавку не використовували [17–19].

Наразі у світі тривають дослідження можливостей досягнення високої точності форми керамічних куль за допомогою алмазного шліфування, тому цілком логічним є застосувати шліфування не лише для надання заготовкам куль сферичної форми, але й одночасно для підвищення (наскільки можливо) точності форми заготовок перед подальшим алмазним доведенням. Очевидно, що підвищення точності сферичної поверхні кулі шліфуванням сприяє зменшенню витрат часу на фінішну обробку виробу.

В Інституті надтвердих матеріалів НАН України розроблено й запатентовано спосіб алмазного шліфування куль з технічної кераміки торцем круга [19], під час якого вільно обертові заготовки куль утримуються на площині обертового стола технологічного пристрою завдяки пружному притисненню однією з обернених до стола конусних поверхонь. Обробка здійснюється саме тієї частини заготовок, яка виступає над кільцевим пазом, утвореним крайками конусних поверхонь. Такий спосіб утримання куль на поверхні базування використано авторами даної роботи для дослідження зношування алмазного круга з кільцевим робочим шаром залежно від перекриття ним траєкторії подачі куль і режимів обробки [20]. Однак під час обробки заготовок розміром менше 12 мм пляма їхнього контакту з конусними поверхнями наближається до крайок останніх, тому в наслідок зниження контактної жорсткості й зношування конусних лез втрачається їхня основна функція утримувати вільно обертові кулі під час їхнього шліфування.

Через цю обставину для алмазного шліфування торцем круга керамічних куль розміром < 12 мм з нітриду кремнію за відсутності їхнього виходу за край круга авторами в [21–25] досліджено вплив схеми базування куль, кругової подачі за відсутності або наявності осциляції куль (рис. 1), геометричних параметрів шліфування, а також режимів обробки на показники процесу. Зрозуміло, що ефективне підвищення точності сферичної поверхні кулі під час шліфування сприяє підвищенню ефективності алмазної обробки керамічних куль загалом.

Показниками точності форми куль було обрано непостійність діаметра кулі V_{Dws} й форм-фактор круглограми кулі f_r як певну оцінку розподілу відхилень форми в межах від найглибшої западини до найвищого виступу. Форм-фактор обраховували для кожної круглограми кулі за формулою

$$f_r = p_r^2 / 4\pi A_r,$$

де p_r – довжина круглограми; A_r – площа фігури в межах контуру круглограми [21]. Показниками точності форми поверхні алмазного круга були кут нахилу λ робочої поверхні у радіальному напрямку і коефіцієнт кривини k_p .

Під час шліфування з базуванням на одну точку [21–23] вільно обертові кулі, відокремлені одна від одної сепаратором, спиралися на площину обертового

стола пристрою, розміщеного на верстаті, а з протилежного боку здійснювалося їхнє безперервне шліфування. Сепаратор з кулями мав свободу вільного обертання, спричиненого його взаємодією як з обертовим столом, так і з вільно обертовими кулями, які штовхали сепаратор у напрямку свого руху.

За умов шліфування керамічних куль з базуванням на одну точку й круговою подачею без осциляції куль у [21] показано, що за початкового середнього значення непостійності діаметра куль $V_{DwL} = 45,5$ мкм у проведених дослідках з підвищенням частоти обертання алмазного круга до верхнього рівня варіювання значення непостійності зменшилися до діапазону 27,7–38,1 мкм. Крім того, існує область змінювання режимів, за яких значення форм-фактора круглограми куль є $f_r = 1 \pm 5 \cdot 10^{-5}$, тобто відхилення профілю куль від сфери мінімальні. Розмах коливання координат лінії профілю алмазного круга зменшився з 237 до 158–162 мкм.

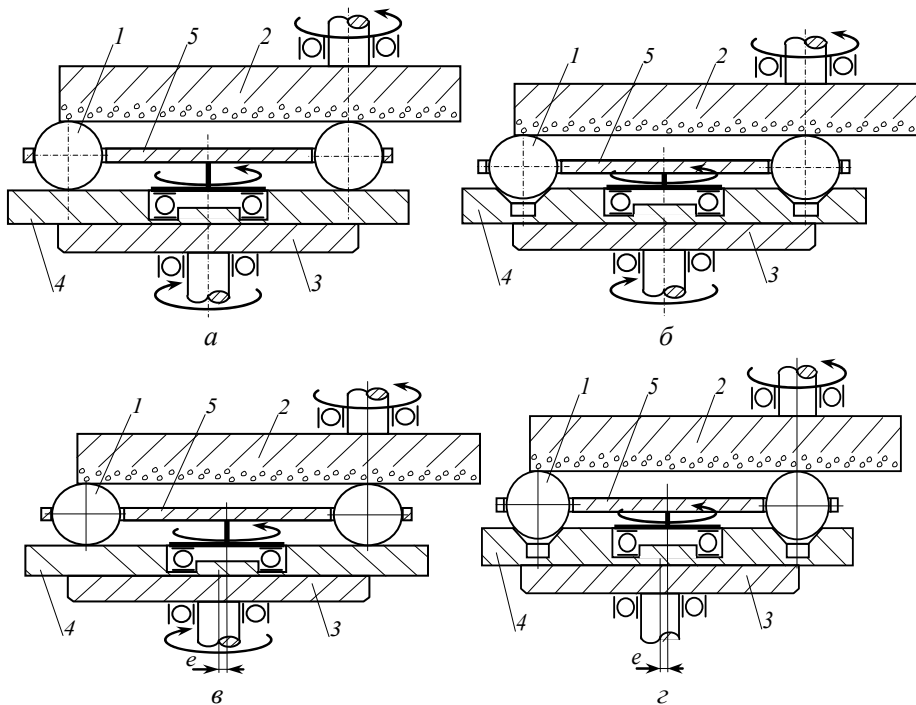


Рис. 1. Способи алмазного шліфування керамічних куль з базуванням на площину (а, в) і у кільцеву канавку (б, г); з круговою подачею без осциляції (а, б) і з осциляцією куль (в, г): 1 – оброблювані кулі; 2 – алмазний круг; 3 – обертовий стіл пристрою; 4 – планшайба; 5 – сепаратор.

За умов шліфування керамічних куль з базуванням на одну точку й круговою подачею, але з осциляцією куль, яка мала місце завдяки введенню ексцентриситету між осями обертання стола пристрою й сепаратора у [22] показано, що за середнього значення непостійності діаметра куль $V_{DwL} = 38,0$ мкм її найнижчі значення (25,9–28,5 мкм) спостерігали за верхнього рівня варіювання частоти обертання алмазного круга й нижнього рівня варіювання його дискретної подачі. Також існує область змінювання режимів обробки, за яких значення форм-фактора змінюються поблизу одиниці. Розмах коливання координат лінії профілю круга знаходився в межах 115–150 мкм.

У разі шліфування куль з базуванням на одну точку й круговою подачею з осциляцією куль у [23] досліджено вплив геометричних параметрів шліфування: перекриття осі обертання круга окружностями розміщення куль – зовнішньою або внутрішньою, співвідношення кількості куль на зовнішній і внутрішній окружностях, ексцентриситету поля траєкторій куль відносно осі обертання круга. Показано, що за середнього значення $V_{DwL} = 25$ мкм менші значення $V_{DwLmin} = 16,9\text{--}21,7$ мкм спостерігали за умови перекриття осі обертання круга зовнішньою окружністю розміщення куль, значення співвідношення їхньої кількості 1,67 і наявності ексцентриситету поля траєкторій куль. У разі змінювання режимів обробки у межах дослідженого діапазону не спостерігали значень форм-фактора поблизу одиниці.

Загальним для розглянутих у [23] умов шліфування є, по-перше, неухильне зниження середнього значення V_{DwL} за подачі з осциляцією куль, якому сприяє також розосередження куль не лише на зовнішній окружності, але й залежно від радіуса розташування, а по-друге, неможливість змінити форму зношенуваної поверхні круга лише варіюванням режимів обробки.

Під час шліфування керамічних куль з базуванням на дві точки [24, 25] вільно обертові кулі, відокремлені одна від одної сепаратором, спиралися на стінки кільцевої канавки V-подібного профілю, виконаній у плоско-паралельній планшайбі, розміщеній без або з ексцентриситетом на обертовому столі пристрою, а з протилежного боку здійснювали їхнє безперервне шліфування.

Як показано у [24], під час шліфування керамічних куль з базуванням на дві точки й круговою подачею без осциляції куль має місце тенденція поступового переходу значень кута нахилу λ лінії профілю алмазного круга від від'ємних до додатних залежно від режимів обробки, тобто з'являється можливість впливати на форму круга змінюванням режимів шліфування. Отримані під час дослідів мінімальні значення кута нахилу λ ($-0,18651\text{--}(+0,38816)$) зафіксовано за верхнього рівня варіювання кругової подачі куль, а значення кута λ , що близькі нуля, можна досягти за умови одночасного певного підвищення інших режимів. Щоправда, для наведеного діапазону змінювання λ значення коефіцієнта k_p ($-0,00903\text{--}(-0,01234)$) є одними з найбільших. Розмах коливання координат лінії профілю круга знаходився в межах 62–152 мкм.

Під час шліфування керамічних куль з базуванням на дві точки й круговою подачею з осциляцією куль у [25] показано, що за середнього значення $V_{DwL} = 28,7$ мкм за умови верхнього рівня варіювання кругової подачі й певних значень інших режимів обробки досягли значення $V_{DwLmin} = 14,2\text{--}17,9$ мкм. Й також існує область режимів обробки, за яких значення форм-фактора змінюються поблизу одиниці. Крім того, спостерігали тенденцію зменшення абсолютних значень кута нахилу λ , хоча й без зміни знаку, а мінімальних значень λ ($-0,17094\text{--}(-0,19499)$) так само можна досягти за верхнього рівня варіювання частоти кругової подачі. Також має місце зменшення розмаху коливань координат профілю алмазного круга до 37–78 мкм – найнижчого показника серед досліджених умов шліфування.

Якщо за ефективність або результативність будь-якого процесу (дії) вважати відношення його результату до витрат на процес, то у такому розумінні ефективність алмазного шліфування керамічних куль є відношенням результату (тобто певної точності сферичної поверхні куль за певної точності плоскої форми алмазного круга) до витрат на процес (продуктивності залежно від умов алмазного шліфування). У разі покращення результату або зменшення витрат підвищується ефективність процесу шліфування.

Як вже зазначалося, показниками результату, а саме, точності форми куль, є непостійність діаметра кулі й форм-фактор круглограми кулі. А витрати характеризуються схемою базування куль – на площину або у кільцеву канавку, круговою подачею за відсутності або наявності осциляції куль, а також режимами обробки.

З наведених у [23, 25] результатів експериментальних досліджень очевидним є підвищення ефективності алмазного шліфування керамічних куль за наявності їхньої осциляції – середні й мінімальні значення непостійності діаметра куль зменшуються, а значення форм-фактора за певних умов змінюються поблизу одиниці. За наявності осциляції куль й базування на площину непостійність їхнього діаметра V_{DwLmin} зменшується до значення 17,4 мкм зі швидкістю зменшення 0,33 мкм/хв, а за базування у канавку вже до значення 14,2 мкм зі швидкістю 0,24 мкм/хв (в обох випадках $\omega_k = 167,6 \text{ с}^{-1}$, $\omega_z = 28,8 \text{ с}^{-1}$). Тобто кращий результат спостерігали у другому випадку, хоча швидкість його досягнення дещо нижча.

Водночас кожна з досліджених схем базування куль має певні обмеження за умови збереження в межах можливого плоскої форми поверхні алмазного круга, яка також має вплив на результат обробки. Як уже згадували, під час шліфування керамічних куль з базуванням на дві точки й круговою подачею за відсутності осциляції куль з'являється можливість впливати на форму круга змінюванням режимів шліфування. У даному дослідженні використовували один із показників точності форми поверхні алмазного круга, яким є кут нахилу поверхні круга у радіальному напрямку. З наведених у [24] результатів у разі відсутності осциляції куль й базування у канавку кут нахилу збільшується від від'ємних до додатних значень зі швидкістю зростання $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ за умови вибору режимів обробки $\omega_k = 167,6 \text{ с}^{-1}$, $s_b = 0,03 \text{ мм/10 хв}$, $\omega_z = 18,3 \text{ с}^{-1}$. Зі зростанням кругової подачі до $\omega_z = 28,8 \text{ с}^{-1}$ ця швидкість падає до $1,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. За наявності осциляції куль й базування у канавку [25] збільшення кута нахилу до додатних значень не спостерігали.

Отже актуальною з погляду авторів є відповідь на питання, чи можливе підвищення точності сферичної поверхні куль й одночасне збереження у певних межах плоскої форми поверхні алмазного круга за незмінних умов алмазного шліфування куль, чи слід застосувати послідовну зміну умов алмазного шліфування куль для досягнення спочатку плоскої форми поверхні алмазного круга й потім уточнення форми куль. Тобто які умови або змінювання умов алмазного шліфування сприяють підвищенню його ефективності?

Тому метою даного дослідження є визначення умов алмазного шліфування, які сприяють підвищенню ефективності процесу.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для доведення доцільності ведення процесу з базуванням куль у канавці за відсутності їхньої осциляції з метою збереження плоскої форми алмазного круга або усунення увігнутості його поверхні авторами здійснено аналітичне дослідження у формі плану повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^3 на підґрунті результатів, отриманих у [24, 25]. Показниками форми зношеної поверхні алмазного круга були кут нахилу λ профілю робочої поверхні у радіальному напрямку і коефіцієнт k_p складової другого порядку квадратичного рівняння апроксимації профілю у вказаному напрямку, іншими словами – коефіцієнт кривини, для обрахунку яких вимірювали усереднену координату y_m профілю поверхні. Згідно плану ПФЕ типу 2^3 визначали коефіцієнти впливу трьох факторів режиму обробки: кругової подачі заготовок ω_z , частоти обертання алмазного круга ω_k і фактора наявності/відсутності осциляції куль ω_k . Оскільки ПФЕ містить кінцеву кількість дослідів, він дозволяє отримати ли-

ше вибіркові оцінки коефіцієнтів лінійного рівняння, а план типу 2^3 вибрано з метою виявлення відмінностей, які перевищують подвійну стандартну похибку (тут і далі згідно з рекомендаціями [26]).

Через те, що рівні варіювання дискретної подачі круга на врізання s_b під час шліфування без осциляції куль (0,03 мм/10 хв і 0,06 мм/10 хв [24]) відрізнялися від таких за умов шліфування з осциляцією куль (0,02 мм/5 хв і 0,05 мм/5 хв [25]), на першому етапі дослідження здійснювали варіювання факторами за максимальних рівнів варіювання дискретної подачі s_b : 0,1 мкм/с (0,06 мм/10 хв) для шліфування без осциляції куль і 0,167 мкм/с (0,05 мм/5 хв) для шліфування з осциляцією куль. На другому етапі дослідження область факторного простору була обмежена мінімальними рівнями варіювання дискретної подачі – відповідно 0,05 мкм/с (0,03 мм/10 хв) і 0,067 мкм/с (0,02 мм/5 хв).

На обох етапах дослідження план експериментів передбачав варіювання іншими факторами на наступних двох рівнях: кругової подачі куль ω_3 – 18,3 і 28,8 с^{-1} ($n_3 = 175$ і 275 об/хв), частоти обертання алмазного круга ω_k – 104,7 і 167,6 с^{-1} ($n_k = 1000$ і 1600 об/хв). Відсутність чи наявність осциляції куль позначали фактором o_k : за відсутності осциляції значення фактору $o_k = -1$ і за її наявності $o_k = +1$.

Розраховані за отриманою моделлю величини позначали прописною літерою Y , а відгуки у дослідях – рядковою літерою y . Ефекти факторів вважали головними у разі переходу від нижнього до верхнього рівня їхнього варіювання і позначали прописними літерами. Суму восьми відгуків позначали прописною літерою T . Для обчислення коефіцієнтів лінійної моделі у факторних експериментах з обраними показниками скористалися алгоритмом Йетса, який для зручності реалізується у табличному вигляді і полягає у операціях над результатами ПФЕ, записаними у стовпчику (0). Перша операція алгоритму полягає спочатку у попарному додаванні результатів дослідів зі стовпчика (0), а потім – у попарному відніманні, причому верхнє число віднімається від нижнього, з наступним записом результатів у стовпчик (1). Друга операція полягає у попарному додаванні й відніманні результатів, записаних у стовпчик (1), з наступним записом результатів у стовпчик (2) і т.д. Значення коефіцієнтів отримують діленням результатів стовпчика (3) на кількість дослідів. Адекватність математичних моделей перевіряли за F -критерієм Фішера, через обчислення значення Y за зворотним алгоритмом Йетса, що найбільш просто здійснюють за допомогою запису ефектів у зворотному порядку, виконання того ж набору додавань і віднімань та зчитуванням передбачених значень – у порядку, зворотному звичайному. У такий спосіб отримували рівняння математичних моделей досліджуваних показників, які адекватно описували об'єкт експерименту.

На наступному етапі для з'ясування питання вибору частоти обертання і дискретної подачі алмазного круга, а також визначення області налаштування кругової подачі куль з умови збереження його плоскої форми у такому процесі шліфування куль спланували ПФЕ типу 2^2 за відповідними результатами дослідів, наведеними у [24]. Варіювали параметрами ω_3 і ω_k за дискретної подачі круга s_b на рівні спочатку 0,05 мкм/с, потім 0,1 мкм/с. Також варіювали параметри s_b і ω_3 спочатку за частоти обертання алмазного круга на рівні 104,7 с^{-1} , потім 167,6 с^{-1} .

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Значення λ і k_p , які обрали з [24, 25] на першому етапі дослідження для зазначених вище рівнів варіювання факторами, представлено у табл. 1, де застосовано позначення опису експериментальних умов малими буквами як

найбільш компактне, оскільки за такої умови відсутність відповідної літери вказує на нижній рівень фактора, а її наявність – на верхній рівень. Результати обчислень коефіцієнтів регресії за алгоритмом Йетса представлено в табл. 2, 3, позначення ефектів наведено лише у табл. 2 в останньому стовпчику (у табл. 3 ці позначення не наведено).

Таблиця 1. Показники форми профілю алмазного круга

Позначення досліджу	Рівні варіювання факторами			Показники форми профілю круга				Джерело
	$\omega_a, \text{с}^{-1}$	$\omega_k, \text{с}^{-1}$	σ_k	$\lambda, \text{рад}$	$\sigma_\lambda, \text{рад}$	k_p	σ_k	
(1)	18,3	104,7	–1	0,67942	$1,2 \cdot 10^{-4}$	–0,012810	$2,52 \cdot 10^{-3}$	[24]
<i>a</i>	28,8	104,7	–1	–0,77428		0,000870		
<i>b</i>	18,3	167,6	–1	0,41039		–0,008880		
<i>ab</i>	28,8	167,6	–1	–0,18651		–0,009030		
<i>c</i>	18,3	104,7	+1	–0,31585	$2,56 \cdot 10^{-4}$	–0,001414	$2,33 \cdot 10^{-3}$	[25]
<i>ac</i>	28,8	104,7	+1	–0,20128		–0,008542		
<i>bc</i>	18,3	167,6	+1	–0,20551		–0,004360		
<i>abc</i>	28,8	167,6	+1	–0,25336		–0,001414		

Таблиця 2. Обчислення коефіцієнтів моделі змінювання λ

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	$(3)/2^3$	Ефект
(1)	0,67942	–0,09486	0,12902	–0,84698	–0,10587	<i>T</i>
<i>a</i>	–0,77428	0,22388	–0,97600	–1,98388	–0,24799	<i>A</i>
<i>b</i>	0,41039	–0,51713	–2,05060	0,37700	0,04713	<i>B</i>
<i>ab</i>	–0,18651	–0,45887	0,06672	0,69438	0,08680	<i>AB</i>
<i>c</i>	–0,31585	–1,45370	0,31874	–1,10502	–0,13813	<i>C</i>
<i>ac</i>	–0,20128	–0,59690	0,05826	2,11732	0,26467	<i>AC</i>
<i>bc</i>	–0,20551	0,11457	0,85680	–0,26048	–0,03256	<i>BC</i>
<i>abc</i>	–0,25336	–0,04785	–0,16242	–1,01922	–0,12740	<i>ABC</i>

Таблиця 3. Обчислення коефіцієнтів моделі змінювання k_p

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	$(3)/2^3$
(1)	–0,012810	–0,011940	–0,029850	–0,045580	–0,005698
<i>a</i>	0,000870	–0,017910	–0,015720	0,009348	0,001169
<i>b</i>	–0,008880	–0,009956	0,013530	–0,001788	–0,000224
<i>ab</i>	–0,009030	–0,005774	–0,004182	–0,003756	–0,000470
<i>c</i>	–0,001414	0,013680	–0,005970	0,014120	0,001765
<i>ac</i>	–0,008542	–0,000150	0,004182	–0,017712	–0,002214
<i>bc</i>	–0,004360	–0,007128	–0,013830	0,010152	0,001269
<i>abc</i>	–0,001414	0,002946	0,010084	0,023904	0,002988

Середня стандартна похибка λ обрахована як середнє арифметичне значень похибки λ у відповідних джерелах і дорівнює $1,88 \cdot 10^{-4}$ рад. Стандартна похибка

контраст-сум стовпчика (3) у табл. 2 дорівнює $1,88 \cdot 10^{-4}$ рад. $\sqrt{8} = 5,32 \cdot 10^{-4}$ рад, а стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика – $1,88 \cdot 10^{-4}$ рад / $\sqrt{8} = 6,65 \cdot 10^{-5}$ рад. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів $\lambda = 1,33 \cdot 10^{-4}$ рад. Як видно (див. табл. 2), всі виявлені відмінності λ перевищують подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів і за попередньою оцінкою є реальними.

Середня стандартна похибка k_p обрахована як середнє арифметичне значень похибки k_p у відповідних джерелах й вона дорівнює $2,43 \cdot 10^{-3}$. Стандартна похибка контраст-сум стовпчика (3) у табл. 3 для k_p дорівнює $2,43 \cdot 10^{-3} \sqrt{8} = 6,87 \cdot 10^{-3}$, а стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика – $2,43 \cdot 10^{-3} / \sqrt{8} = 6,87 \cdot 10^{-5}$. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів $k_p = 1,37 \cdot 10^{-4}$. Як видно з табл. 3, всі виявлені відмінності k_p перевищують подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів і за попередньою оцінкою є реальними.

Перевірка коефіцієнтів моделей змінювання λ і k_p за критерієм Стюдента показала наступне. Статистично значимим у змінюванні λ виявився за довірчої ймовірності $p = 95\%$ ($t_{c\,95;7} = 2,3646$) вплив головного ефекту A , а вплив взаємодії факторів AC є більшим за головний. У змінюванні k_p статистично значимим за довірчої ймовірності $p = 90\%$ ($t_{c\,90;7} = 1,8946$) є вплив головного ефекту C і взаємодій факторів AC і ABC .

Статистична значимість впливу на змінювання λ і k_p взаємодії факторів AC свідчить про зростання в деякій частині факторного простору впливу ефектів A або C . Водночас статистична значимість впливу на змінювання k_p взаємодії факторів ABC свідчить про зростання в деякій частині факторного простору також впливу ефекту B . Іноді виявляється, що відгуки в точках, розташованих у таких частинах факторного простору, дуже великі (або дуже малі), тоді як значення відгуків в інших точках невиразні. Тому з використанням зворотного алгоритму Йетса перевіряли, чи призводить спільний вплив головного ефекту і взаємодії факторів AC до екстремальних відгуків λ і k_p у певній частині досліджуваного факторного простору.

У табл. 4 показано середні відгуки λ для взаємодії факторів AC . Тут вісім спостережених значень згруповані у двовимірну таблицю $A \times C$. Праворуч ті самі дані показані усередненими попарно.

Таблиця 4. Обчислення середніх відгуків взаємодій AC для λ

	–	A	A	
–	0,67942	–0,77428	C	0,54491
	0,41039	–0,18651		0,48940
C	–0,31585	–0,20128		– за середнього значення –0,10587
	–0,20551	–0,25336		
				–0,26068
				–0,22732

Дані табл. 4 свідчать про наявність екстремальних відгуків λ від спільного впливу головного ефекту A і взаємодії факторів AC за умови, коли ефект C наближається до нижнього рівня варіювання, тому гіпотеза про наявність екстремальних відгуків λ є виправданою. Однак ці екстремальні відгуки λ є далекими від області поблизу нульового значення λ , яка нас цікавить.

З урахуванням того, що фактор C є дискретним, а інші два неперервними змінними, немає сенсу будувати звичну модель змінювання, яка включає фактор C . Оскільки за дискретного C член взаємодії за його участі не має звичайної інтерпретації, слід навести пару лінійних рівнянь для різних рівнів варіювання C [26]. Для показника λ такою парою лінійних рівнянь є

$$\begin{aligned}\lambda|_{C-} &= -0,84698 - 1,98388x_1 + 2,11732x_1(-1) = -0,84698 - 4,1012x_1; \\ \lambda|_{C+} &= -0,84698 - 1,98388x_1 + 2,11732x_1(+1) = -0,84698 + 0,13344x_1.\end{aligned}$$

Авторів даної роботи цікавила саме та частина факторного простору, відгуки в точках якої показують, поряд з іншими, значення λ різного знаку поблизу нуля. Очевидно, що лінійне рівняння $\lambda|_{C-}$ показує саме такі результати.

Якщо проаналізувати у такий спосіб спільний вплив головного ефекту C і взаємодій AB , AC і BC на середні відгуки k_p , неважко пересвідчитися, що екстремальні відгуки k_p мають місце. Слід зазначити, що середні відгуки k_p мають найменше значення за умови, коли ефект B наближається до нижнього рівня варіювання, а ефект A – до верхнього.

З урахуванням дискретності фактору C пара лінійних рівнянь k_p для різних рівнів C і ефекту B у взаємодії ABC на нижньому рівні варіювання матиме наступний вид:

$$\begin{aligned}k_p|_{B-C-} &= -0,04558 + 0,01412(-1) - 0,017712x_1(-1) + 0,023904x_1(-1)(-1) = \\ &= -0,0597 + 0,041616x_1; \\ k_p|_{B-C+} &= -0,04558 + 0,01412(+1) - 0,017712x_1(+1) + 0,023904x_1(-1)(+1) = \\ &= -0,03146 - 0,041616x_1.\end{aligned}$$

Формально авторів цікавила саме та частина факторного простору, відгуки в точках якої показують, поряд з іншими, значення k_p різного знаку поблизу нуля. Але з іншого боку, вже обрано умови шліфування (кінематику і режими), за яких значення кута нахилу λ в певній частині факторного простору є ефективними. Тому в даному разі автори зупинилися на лінійному рівнянні $k_p|_{B-C-}$.

У такий же спосіб отримано лінійні моделі на другому етапі дослідження за рівнів дискретної подачі 0,05 і 0,067 мкм/с. Тут, на відміну від першого етапу, статистично значимим у змінюванні і λ і k_p виявився за довірчої ймовірності $p = 95\%$ ($t_{c\ 95;7} = 2,3646$) вплив головного ефекту A , а вплив взаємодії факторів AC є більшим за головний. І тут лінійне рівняння $\lambda|_{C-}$ (як і лінійне рівняння $k_p|_{C-}$) показують значення показників різного знаку, але поблизу нуля:

$$\begin{aligned}\lambda|_{C-} &= -1,63022 - 4,1463x_1; \\ k_p|_{C-} &= -0,0305 + 0,0504x_1.\end{aligned}$$

Тож для збереження у певних межах плоскої форми поверхні алмазного круга вважаємо підтвердженою доцільність ведення процесу з базуванням куль у канавці за відсутності їхньої осциляції поки що без врахування впливу режимів шліфування.

Для з'ясування питання вибору частоти обертання і дискретної подачі алмазного круга, а також визначення області налаштування кругової подачі куль з умови збереження його плоскої форми у такому процесі шліфування куль спланували аналітичний ПФЕ типу 2^2 за відповідними результатами дослідів, наведеними у [24]. Варіювали параметрами ω_z і ω_k за дискретної подачі круга s_b на рівні спочатку 0,05 мкм/с, потім 0,1 мкм/с. Також варіюва-

ли параметрами s_B і ω_3 спочатку за частоти обертання алмазного круга на рівні $104,7 \text{ c}^{-1}$, потім $167,6 \text{ c}^{-1}$.

Перевірка коефіцієнтів моделі змінювання λ за критерієм Стюдента показала, що за дискретної подачі круга $s_B = 0,05 \text{ мкм/с}$ статистично значимим за довірчої ймовірності $p = 80 \%$ ($t_{c\ 80;3} = 1,6377$) є вплив лише кругової подачі куль ω_3 . За дискретної подачі круга $s_B = 0,1 \text{ мкм/с}$ вплив головних ефектів і взаємодії факторів є статистично незначущим. Така ж перевірка коефіцієнтів за обох частот обертання алмазного круга показала, що статистично значущим є лише вплив кругової подачі куль ω_3 .

Значення λ за дискретної подачі круга $s_B = 0,05 \text{ мкм/с}$, а також за частоти обертання алмазного круга $\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$ представлено у табл. 5, результати обчислень за алгоритмом Йетса коефіцієнтів регресії моделей змінювання λ – у табл. 6.

Таблиця 5. Значення кута нахилу λ профілю алмазного круга

Позначення досліджу	Рівні варіювання факторами		$s_B = 0,05 \text{ мкм/с}$	Рівні варіювання факторами		$\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$
	$\omega_3, \text{ c}^{-1}$	$\omega_k, \text{ c}^{-1}$	$\lambda, \text{ рад}$	$\omega_3, \text{ c}^{-1}$	$s_B, \text{ мкм/с}$	$\lambda, \text{ рад}$
(1)	18,3	104,7	0,53688	18,3	0,05	0,38816
<i>a</i>	28,8	104,7	−0,79250	28,8	0,05	−0,35561
<i>b</i>	18,3	167,6	0,38816	18,3	0,1	0,41039
<i>ab</i>	28,8	167,6	−0,35561	28,8	0,1	−0,18651

Таблиця 6. Обчислення коефіцієнтів регресії моделі λ

Позначення досліджу	$s_B = 0,05 \text{ мкм/с}$				$\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$			
	(0)	(1)	(2)	(2)/2 ³	(0)	(1)	(2)	(2)/2 ³
(1)	0,53688	−0,25562	−0,22307	−0,02788	0,38816	0,79855	0,25643	0,03205
<i>a</i>	−0,79250	0,03255	−2,07315	−0,25914	−0,35561	−0,54212	0,19133	0,02392
<i>b</i>	0,38816	−1,32938	0,28817	0,03602	0,41039	0,02223	−1,34067	−0,16758
<i>ab</i>	−0,35561	−0,74377	0,58561	0,07320	−0,18651	0,16910	0,14687	0,01836

За $\omega_k = 104,7 \text{ c}^{-1}$ і $\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$ лінійні рівняння λ з кодованими значеннями факторів мають вигляд

$$\lambda_{104,7} = 0,25643 - 1,34067x_1;$$

$$\lambda_{167,6} = -0,35048 - 2,78308x_1.$$

Обчислення значень Y за моделями λ здійснили за допомогою зворотного алгоритму Йетса, перевірку на адекватність – за F -критерієм Фішера, порівнюючи його з табличним значенням $F_{(0,05, 3, 8)} = 4,07$.

Лінійні рівняння λ з натуральними значеннями факторів за $\omega_k = 104,7 \text{ c}^{-1}$ і $\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$ мають вигляд

$$\lambda_{104,7} = 1,5167 - 0,06626\omega_3;$$

$$\lambda_{167,6} = 0,78379 - 0,03192\omega_3.$$

На рис. 2 вертикальними лініями показано межі області налаштування кругової подачі куль ω_3 , за яких кут нахилу λ лінії профілю алмазного круга

не перевищує значень $\lambda < \pm 5^\circ$ (горизонтальні переривчасті лінії), а саме: $21,6 \text{ c}^{-1} < \omega_3 < 24,2 \text{ c}^{-1}$ за $\omega_k = 104,7 \text{ c}^{-1}$ і $21,8 \text{ c}^{-1} < \omega_3 < 27,3 \text{ c}^{-1}$ за $\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$. Очевидно, що за $\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$ область налаштування кругової подачі куль ω_3 , є ширшою.

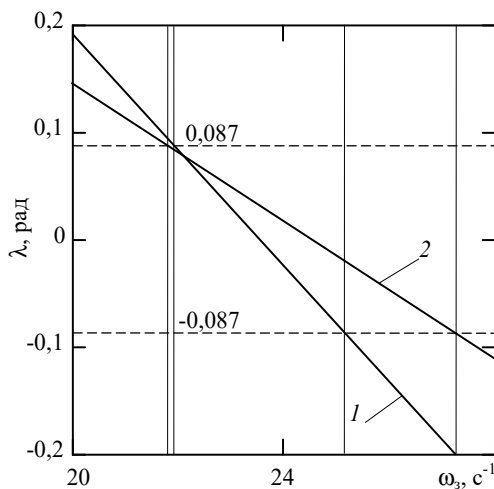


Рис. 2. Налаштування кругової подачі куль ω_3 за обмежень кута нахилу $\lambda < \pm 5^\circ$ за частоти обертання алмазного круга 104,7 (1) і 167,6 (2) c^{-1} .

Тож для збереження плоскої форми алмазного круга або усунення увігнутості його поверхні вважаємо підтвердженою доцільність ведення процесу шліфування керамічних куль з базуванням останніх у канавці й вибору кругової подачі за відсутності їхньої осциляції на режимах: частота обертання алмазного круга $\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$ і його дискретна подача $s_b = 0,03 \text{ мм/10 хв}$, та налаштуванням кругової подачі куль в області $21,8 \text{ c}^{-1} < \omega_3 < 27,3 \text{ c}^{-1}$.

В цих умовах стає очевидною необхідність зміни умов шліфування так, щоб повернути форму поверхні алмазного круга до плоскої, або з врахуванням тенденції змінювання цієї форми до увігнутої на стадії фінішного шліфування керамічних куль навіть забезпечити випуклу форми поверхні круга з кутом нахилу лінії профілю, наприклад, не більше $+5^\circ$, щоб компенсувати у такий спосіб дію цієї тенденції на стадії фінішного шліфування куль. Для цього слід скористатися запропонованими налаштуваннями процесу шліфування з вибором мінімального значення кругової подачі куль в області налаштування, тобто $\omega_3 = 21,8\text{--}22,0 \text{ c}^{-1}$.

Було розраховано час обробки, необхідний для зростання кута нахилу від значення $\lambda = -0,30938 \text{ рад}$, з яким закінчується стадія фінішного шліфування куль для досягнення $V_{DwLmin} \rightarrow 14,2 \text{ мкм}$, до $\lambda = 0,08727 \text{ рад}$ – значення, якого потрібно досягти перед початком стадії фінішного шліфування. З урахуванням значення швидкості v_λ зростання кута нахилу для різних рівнів варіювання кругової подачі, які наведено вище, розраховували її значення для $\omega_3 = 21,8 \text{ c}^{-1}$:

$$v_\lambda = 1,6 + (1,16 - 1,6) \cdot 10^{-3} / (28,8 - 18,3) \cdot (21,8 - 18,3) \text{ c}^{-1} = 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}.$$

Тоді час обробки t_λ , необхідний для заміни увігнутої форми поверхні алмазного круга на випуклу з кутом нахилу лінії профілю поверхні не більше $+5^\circ$, буде

$$t_\lambda = (0,08727 + 0,30938) / 1,45 \cdot 10^{-3} = 273,6 \text{ с},$$

або $\sim 4 \text{ хв}$.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як зазначено у наведеному на початку статті огляді процесу алмазного шліфування керамічних куль, за розглянутих схем їхнього базування й кругової подачі, як без осциляції, так і з їхньою осциляцією, найкращі результати зі зменшення непостійності діаметра куль до 14,2–17,9 мкм показує процес шліфування куль з базуванням останніх у канавці й круговою подачею з їхньою осциляцією за певних режимів обробки [25]. Однак через нерівномірне зношування алмазного круга у радіальному напрямку форма його робочої поверхні залишається весь час увігнутою незалежно від варіювання режимами обробки. У разі досягнення вказаних значень непостійності діаметра куль кут нахилу лінії профілю у радіальному напрямку алмазного круга сягає значень $-0,20128$ – $(-0,30938)$ рад [25]. Подібне явище зі змінюванням форми круга з плоскої на увігнуту спостерігають під час округлення заготовок керамічних куль до сферичної форми алмазним шліфуванням за схеми їхнього базування на площині [21].

Згідно з результатами проведених у роботі досліджень показано необхідність зміни умов шліфування так, щоб повернути форму поверхні алмазного круга до плоскої чи випуклої. Для цього слід скористатися запропонованими налаштуваннями процесу шліфування з вибором мінімального значення кругової подачі куль в області налаштування, тобто $\omega_3 = 21,8$ – $22,0$ с^{-1} .

Тож такі зміни у веденні процесу шліфування куль з метою усунення від'ємного кута нахилу лінії профілю круга можна зробити:

- по-перше, після закінчення етапу округлення заготовок куль з їхнім базуванням на площині, з продовженням процесу шліфування з базуванням куль вже у канавці й круговою подачею без осциляції на режимах $\omega_k = 167,6$ с^{-1} , $s_b = 0,03$ мм/10 хв, $\omega_3 = 21,8$ с^{-1} протягом періоду обробки, який визначається набутих після округлення заготовок кутом нахилу лінії профілю круга і наведеним у даній роботі значенням швидкості зростання кута нахилу $v_\lambda = 1,45 \cdot 10^{-3}$ с^{-1} аж до переходу на стадію фінішного шліфування куль для досягнення потрібних мінімальних значень непостійності діаметра куль на режимах $\omega_k = 167,6$ с^{-1} , $s_b = 0,02$ мм/5 хв, $\omega_3 = 28,8$ с^{-1} , що забезпечить зменшення непостійності діаметра куль до 14,2–17,9 мкм, або

- по-друге, після закінчення стадії фінішного шліфування чергової партії куль і перед переходом до фінішного шліфування наступної партії куль. Тут процес шліфування наступної партії куль слід починати з базуванням куль у канавці й круговою подачею без осциляції на режимах $\omega_k = 167,6$ с^{-1} , $s_b = 0,03$ мм/10 хв, $\omega_3 = 21,8$ с^{-1} , а для визначення періоду шліфування з круговою подачею без осциляції куль слід враховувати вже від'ємне значення кута нахилу лінії профілю круга, набутого після закінчення стадії фінішного шліфування попередньої партії куль.

Отже, підвищити ефективність алмазного шліфування керамічних куль дозволяє перехід на ведення процесу із зазначеною вище зміною як схеми базування куль, так і особливостей кругової подачі останніх, звісно, із застосуванням відповідних режимів обробки.

ВИСНОВКИ

Для алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію розглянуто переваги й недоліки ведення процесу з базуванням куль на площині й у канавці V-подібного профілю за кругової подачі куль як за відсутності, так і за наявності їхньої осциляції.

Показано, що впливати на форму алмазного круга під час зношування останнього зміною режимів шліфування дозволяє лише ведення процесу з базуванням куль у канавці й круговою подачею за відсутності їхньої осциляції й на режимах обробки $\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$, $s_b = 0,03 \text{ мм/10 хв}$, $\omega_z = 21,8 \text{ c}^{-1}$ протягом періоду обробки, який визначають набутим до застосування вказаних налаштувань і режимів обробки від'ємним значенням кута нахилу лінії профілю круга, і це дозволяє усунути увігнутість поверхні алмазного круга.

Запропоновано підвищити ефективність алмазного шліфування керамічних куль за допомогою ведення процесу зі зміною налаштувань від схеми базування куль на площині на стадії округлення заготовок куль, з продовженням процесу шліфування вже з базуванням куль у канавці й круговою подачею без осциляції із застосуванням також вказаних вище режимів обробки на стадії усунення увігнутості форми алмазного круга, й наступного переходу на стадію фінішного шліфування куль з їхнім базуванням у канавці й круговою подачею з осциляцією на режимах $\omega_k = 167,6 \text{ c}^{-1}$, $s_b = 0,02 \text{ мм/5 хв}$, $\omega_z = 28,8 \text{ c}^{-1}$, що дозволяє зменшити непостійність діаметра куль до значень 14,2–17,9 мкм.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не було профінансовано із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

S. V. Sokhan', V. V. Voznyy, V. H. Sorochenko
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Efficiency of diamond grinding ceramic balls

In article, for diamond grinding of ceramic balls made of silicon nitride the advantages and disadvantages are considered for performances with the balls being based on a plane and in a V-shaped profile groove and with a circular feed of the balls both in the absence and in the presence of their oscillation. The feasibility of grinding the balls with the latter being based in a groove and with a circular feed without their oscillation and in certain machining modes is proven to preserve the flat shape of the diamond wheel or eliminate the concavity of its surface. It is proposed to increase the efficiency of diamond grinding of ceramic balls by switching to conducting the process with a change in the settings of both the ball-basing scheme and the features of the circular feed of the latter, also using the appropriate processing modes.

Keywords: *ceramic balls from silicon nitride, diamond grinding, basing balls for processing, machining modes, oscillation of ball under their circular feed, surface shape of a diamond wheel.*

1. Burgmeier L., Poursaba M. Ceramic hybrid bearings in air-cycle machines. *Trans. ASME*. 1996. Vol. 118. P. 184–190.
2. Wang L., Snidle R.W., Gu L. Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research. *Wear*. 2000. Vol. 246. P. 159–173.
3. Richerson D.W. *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing and Use in Design*. Taylor e Francis Group, Boca Raton, USA, 2006.
4. Ножницкий Ю.А., Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л. Гибридные подшипники качения для авиационных двигателей (обзор). *Авиационные двигатели*. 2019. № 2(3). С. 63–76.
5. Feng M., Wu Y., Yuan J., Ping Z. Processing of high-precision ceramic balls with a spiral V-groove plate. *Front. Mech. Eng*. 2017. Vol. 12. P. 132–142.

6. Heng L., Kim J.S., Song J.H., Mun S.D. A review on surface finishing techniques for difficult-to-machine ceramics by non-conventional finishing processes. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 3, art. 1227.
7. He C., Zhang J., Geng K., Wang S., Meijun L., Zhang X., Chengzu R. Advances in ultra-precision machining of bearing rolling elements. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022. Vol. 122. P. 3493–3524.
8. Gonçalves Pedroso M.P., de Moraes Purquerio B., Fortulan C.A. Manufacturing of green ceramic balls: Machine and process: *Mater. Sci. Forum*. 2016. Vol. 881. P. 200–205.
9. Wang Z., Lv B.H., Yuan J.L., Yang F. On the evaluation of lapping uniformity for precision balls. *Key Eng. Mater.* 2009. Vol. 416. P. 558–562.
10. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Ball Grinding Machine: Foundation Stone for the Entire Rolling Bearing Industry. <https://www.schaeffler.com/en/technology-innovation/pioneering-spirit/>
11. Kurobe T., Morita T., Tsuchihashi N. Super fine finishing ceramic ball using spin angle controlled machining method (in Japanese). *J. JSPE*. 2004. Vol. 70, no. 11. P. 1392–1396.
12. Pedroso M.P.G., Fortulan C.A. Model based design applied to ceramic balls grinding. *CIRP*. 2019. Vol. 81. P. 306–309.
13. Kang J., Hadfield M. A novel eccentric lapping machine for finishing advanced ceramic balls. *J. Eng. Manuf.* 2001. Vol. 215. P. 781–795.
14. Lv C.C., Sun Y.L., Zuo D.W. A novel eccentric lapping method with two rotatable lapping plates for finishing cemented carbide balls: *Int. J. Mechanical Mechatr. Eng.* 2015. Vol. 9, no. 5. P. 684–691.
15. Zhou F., Yuan J., Lyu B., Yao W., Zhao P. Kinematics and trajectory in processing precision balls with eccentric plate and variable-radius V-groove: *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2016. Vol. 84 no. 9. P. 2167–2178.
16. Feng M., Wu Y., Yuan J., Ping Zh. Processing of high-precision ceramic balls with a spiral V-groove plate. *Front. Mech. Eng.* 2017. Vol. 12, no. 1. P. 132–142.
17. Childs T.H.C., Mahmood S., Yoon H.J. Magnetic fluid grinding of ceramic balls. *Tribol. Int.* 1995. Vol. 28, no. 6. P. 341–348.
18. Jiang M., Komanduri R. On the finishing of Si₃N₄ balls for bearing applications, *Wear*. 1998. Vol. 215, no. 1/2. P. 267–278.
19. Пасичный О.О. Алмазно-абразивная обработка деталей типа “шар” из конструкционной керамики. В кн.: *Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля. Т. 6. Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки. Киев, 2007. 340 с.*
20. Sokhan' S.V., Voznyi V.V., Redkin A.V., Sorochenko V.G., Hamaniuk M.P., Zubaniev E.M. Wear of a diamond wheel during grinding of ceramic balls made of silicon carbide. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 6. P. 432–442.
21. Sokhan' S.V., Voznyi V.V., Sorochenko V.G., Hamaniuk M.P. Diamond grinding of ceramic balls with a circular feed. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 4. P. 293–305.
22. Sokhan' S.V., Voznyi V.V., Sorochenko V.G. Diamond grinding of ceramic balls based on a plane with circular feed under oscillation. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 1. P. 54–66.
23. Sokhan' S.V., Voznyi V.V., Sorochenko V.G., Mykyshchenko O.A. Diamond grinding of ceramic balls at varied geometric parameters of the process. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 2. P. 137–150.
24. Sokhan' S.V., Voznyi V.V., Sorochenko V.G., Hamaniuk M.P. Diamond grinding of ceramic balls in an annular groove. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 2. P. 143–153.
25. Sokhan' S.V., Voznyi V.V., Sorochenko V.G. Diamond grinding of ceramic balls based in a groove with circular feed under oscillation. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 4. P. 311–323.
26. Кононюк А.Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента): В 4 т. Т. 2. Киев, Изд-во КНТ, 2011. 453 с.

Надійшла до редакції 01.05.25

Після доопрацювання 20.05.25

Прийнята до опублікування 21.05.25