

С. В. Сохань*, В. В. Возний, В. Г. Сороченко

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*svsokh@gmail.com

Алмазне шліфування керамічних куль з базуванням у канавці й круговою подачею з коливанням

Для алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію з базуванням у канавці й круговою подачею з коливанням представлено результати експериментального дослідження впливу режиму обробки на точність форми куль і форму зношеної поверхні алмазного круга. Показниками точності форми шліфованих куль були непостійність діаметра кулі й форм-фактор круглограми кулі, а форми зношеної поверхні круга – кут нахилу й коефіцієнт кривини лінії профілю робочої поверхні у радіальному напрямку. Означений вплив описано адекватними лінійними функціями показників процесу від частоти обертання алмазного круга й кругової подачі куль. Визначено кінематичні параметри режиму обробки, за яких застосування дослідженої схеми шліфування куль є доцільним.

Ключові слова: керамічні кулі з нітриду кремнію, алмазне шліфування, режим обробки, непостійність діаметра кулі, форм-фактор круглограми, форма зношеної поверхні круга.

ВСТУП

Керамічні кулі у високоточних гібридних підшипниках (зі сталевим внутрішнім і зовнішнім 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 і композиційних матеріалів потребує й неодмінного удосконалення технології алмазної обробки виробів з них [5, 6].

Розвиток технологій механічної обробки керамічних куль до високої степені точності та якості стисло висвітлено в [7–9]: основний принцип абразивної обробки куль між дисками залишається незмінним, проте застосовують ряд різновидів методу. Відтоді, як ідея V-подібної канавки була вперше реалізована у верстаті для шліфування металевих куль для підшипників (Friedrich Fischer, 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 канавка не використовується [17–19].

Здебільшого досягти високої точності форми керамічних куль алмазним шліфуванням важко, але використати його для надання заготовкам куль сферичної форми, яку уточнюють наступним алмазним доведенням, є цілком логічним. Очевидно, що підвищення точності сферичної поверхні кулі шліфуванням сприяє зменшенню витрат часу на фінішування виробу.

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України розроблено й запатентовано спосіб шліфування куль з високотвердої кераміки торцем алмазного круга [19], під час якого вільно обертові заготовки куль утримуються на площині обертового стола верстата завдяки контакту з оберненими до стола конусними поверхнями пристрою. Обробка здійснюється саме тієї частини заготовки, яка виступає над кільцевим пазом, утвореним кромками конусних поверхонь. У [20] ця технологічна схема базування куль використана авторами для дослідження зношування круга залежно від перекриття ним траєкторії подачі куль і режиму обробки. Однак за обробки заготовок розміром менше 12 мм кут загострення крайок конусних поверхонь зменшується як і жорсткість останніх, тому втрачається основна функція крайок утримувати вільно обертові кулі під час їхньої обробки.

Для шліфування керамічних куль розміром < 12 мм торцем алмазного круга авторами досліджено змінювання показників процесу за базування куль у сепараторі на площину або у кільцевій канавці, й круговою подачею без коливання або з коливанням без виходу куль за край круга [21–23]. Під час шліфування з базуванням на площину [21, 22] вільно обертові кулі спираються однією точкою на горизонтальну площину обертового стола пристрою, розміщеного на верстаті, а з протилежного боку здійснюється їхнє безперервне шліфування торцем круга. Вільне обертання сепаратора задається взаємодією як з обертовим столом, так і з вільно обертовими кулями, які штовхають сепаратор у напрямку свого руху.

За кругової подачі куль у [21] показано, що у дослідженому діапазоні змінювання режимів шліфування зі збільшенням частоти обертання алмазного круга значення непостійності діаметра куль зменшилися до діапазону 27,7–38,1 мм, а також існує поєднання режимів, за яких значення форм-фактора є близьким до одиниці (тобто покращується компактність круглограм). Недоліком цього способу шліфування є неможливість змінити форму зношеної поверхні круга, яка залишалася весь час увігнутою за значень коефіцієнта кривини профілю $k_p \leq 0,004$ у переважній більшості дослідів.

У [22] досліджено спосіб шліфування куль за базування куль на площину й кругової подачі з коливанням за рахунок введення невеликого ексцентриситету між осями обертання стола пристрою й сепаратора з виконанням умови невиходу куль за край круга. Наявність ексцентриситету спричиняє з одного боку зміну траєкторії куль, яка стає схожою на подовжену епіциклоїду, параметри якої є функцією вільного обертання сепаратора, з іншого – з'являється коливання відстані від кулі до осі обертання стола і виникає коливання значення відцентрової сили, що діє на кулю, на відміну від постійного значення відцентрової сили у схемі обробки з круговою подачею, де відстань від заготовки до осі обертання стола є постійною. Коливання відцентрової сили сприяє більшій рухливості вільно обертової кулі та її прагненню зайняти положення своїм більшим розміром у напрямку назустріч поверхні алмазного круга. Тут за зменшеної на 20–30 % дискретної подачі круга на врізання непостійність діаметра куль зменшилися до діапазону 25,9–28,5 мм за умови максимальної частоти обертання й мінімальної дискретної подачі алмазного круга. Крім того виявлено область змінювання режимів, за яких значення

форм-фактора близькі до одиниці. Недоліком цього способу шліфування є неможливість змінити форму зношуваної поверхні круга, яка залишалася весь час випуклою. Значення k_p змінювалися у діапазоні $(-0,003)$ – $(-0,007)$.

За умов шліфування керамічних куль з їхнім базуванням у кільцевій канавці замість площини у [23] показано вплив частоти кругової подачі куль на змінюваність форми зношуваної поверхні алмазного круга. Зі збільшенням цієї частоти значення кута нахилу профілю змінювалися з додатних на від'ємні, а значення k_p зменшувалося з 0,009–0,013 до 0,001–0,005 (без врахування знаку). Однак змінюваність форми зношуваної поверхні круга супроводжувалося суттєвим (у 2–3 рази) підвищенням значень непостійності діаметра кулі у порівнянні з результатами [21], що є недоліком цього способу шліфування. Варто зазначити, що найменше значення непостійності діаметра кулі було досягнуто за практично відсутньої кривини профілю поверхні круга ($k_p = 0,0009$).

Недоліком процесів шліфування з круговою подачею за базування куль як на площину, так і у кільцевій канавці є виникнення нерівномірності зношування поверхні алмазного круга, особливо поблизу осі його обертання або краю круга, яка негативно впливає на точність куль і пов'язана насамперед з незмінністю траєкторій куль за їхньої кругової подачі. Крім того, за таких умов має місце тенденція до нерівномірного знімання припуску з формуванням похибки форми у вигляді бочкоподібності. До того ж, застосування кругової подачі з коливанням за базування куль на площину показує позитивний вплив таких умов шліфування на підвищення точності куль, однак змінити форму зношуваної поверхні круга варіюванням режимів процесу не вдається.

Як альтернативу розглянутим умовам шліфування у спробі підвищити точність куль й стабілізувати форму зношуваної поверхні круга у даній роботі розглянуто шліфування з базуванням куль у кільцевій канавці та круговою подачею з коливанням, поєднання яких в одному процесі наразі не досліджено. За одночасної дії обох умов актуальним стає визначення області змінювання режимів, за яких покращується точність куль й показники форми зношуваної поверхні круга змінюються у встановлених межах відхилення від плоскої. Тому метою даного дослідження було встановлення закономірностей алмазного шліфування з базуванням куль у кільцевій канавці та їхньої круговою подачею з коливанням.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Алмазне шліфування керамічних куль з нітриду кремнію проводили на фрезерному верстаті мод. 6Т12 з встановленим на його робочому столі технологічним пристроєм з обертовим столом для розміщення й подачі керамічних куль. Налаштування технологічного пристрою з ексцентриситетом планшайби для базування куль у сепараторі на ній показано на рис. 1, а, схема розташування на обертовому столі пристрою планшайби з сепаратором та кулями – на рис. 1, б.

Як показано на схемі, плоско-паралельна планшайба з розташованою симетрично відносно осі планшайби кільцевою канавкою V-подібного профілю для базування куль фіксується на обертовому столі пристрою з ексцентриситетом відносно осі обертання стола. Оброблювані кулі мають можливість вільного обертання у отворах сепаратора, який у свою чергу має можливість вільного обертання навколо осі симетрії планшайби. Отвори сепаратора виконано по окружності навколо осі його обертання. На схемі відповідними стрілками показано напрямки обертання алмазного круга, стола пристрою й

сепаратора під час шліфування куль. Останні спираються двома точками на стінки кільцевої канавки у планшайбі, а з протилежного боку здійснюється їхнє безперервне шліфування торцем круга. Вільне обертання сепаратора задається взаємодією як з обертовим столом, так і з вільно обертовими кулями, які штовхають сепаратор у напрямку свого руху. У дослідях ексцентриситет осі обертання сепаратора складав 3 мм, діаметр окружності розташування отворів у сепараторі – 147 мм. Через такі геометричні співвідношення й розташування пристрою відносно алмазного круга так, щоб окружність отворів сепаратора на максимальному віддаленні від осі обертання круга була дотичною краю останнього, створювали умови для перекриття цієї осі теоретично симетричним полем нахождення траєкторії руху подачі куль шириною 6 мм. У такий спосіб забезпечували невихід куль за межі круга з одного боку і відсутність ділянок на поверхні круга, які б не контактували з оброблюваними кулями, з іншого.

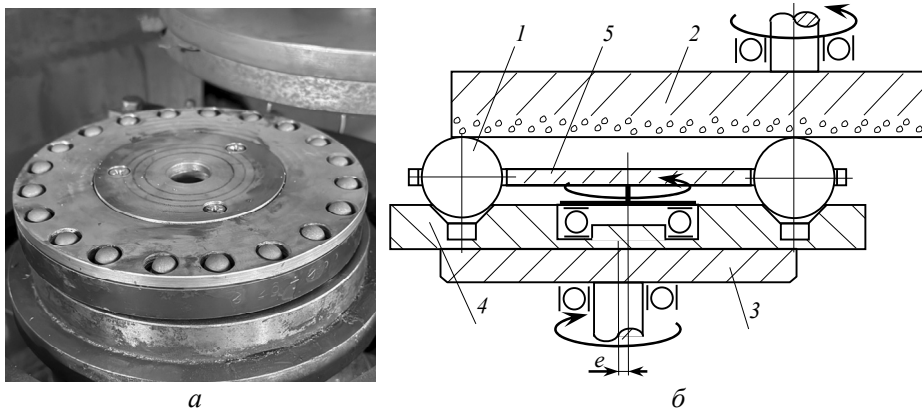


Рис. 1. Налаштування технологічного пристрою з ексцентриситетом кільцевої канавки (а) і схема базування куль у канавці за кругової подачі з коливанням (б): 1 – оброблювані кулі; 2 – алмазний круг; 3 – обертовий стіл пристрою; 4 – планшайба; 5 – сепаратор.

Алмазний шліфувальний круг форми 6A2T 300×3 (з розташуванням суцільного алмазного шару на торці круга) містив алмази марки AC32 зернистістю 200/160 і концентрацією 100 у металевій зв'язці M2-01. Кількість одночасно оброблюваних керамічних куль складала 20 шт.

Показниками точності форми керамічних куль були непостійність діаметра кулі V_{Dws} (позначення згідно ISO 3290-2:2014) й форм-фактор круглограми кулі f_r . Форм-фактор круглограми кулі обраховували для кожної круглограми за формулою $f_r = p_r^2 / 4\pi A_r$, де p_r – довжина кругло грами; A_r – площа фігури в межах контуру круглограми [21]. Як і у [21–23], точність форми керамічних куль оцінювали показником непостійності діаметра кулі, який вказує на максимальну різницю у поточних діаметрах кулі, і показником форм-фактора круглограм, отриманих вимірюванням некруглості на кругломірі у трьох взаємно перпендикулярних перерізах кулі. Застосовувана методика пост-обробки аналогових даних вимірювання некруглості на кругломірі МК-300 полягала у дискретизації потоку поточних значень з кроком у один градус повороту після фільтрації ексцентричності і наступному використанні отриманого масиву для комп'ютерної візуалізації як круглограми й розрахунку форм-фактора. Останній дозволяє кількісно оцінити співвідношення довжини круглограми і площі, охопленої лінією профілю кулі, та використовувати

їх у роботі виключно для порівняння отриманих результатів між собою та результатів попередніх досліджень авторів.

Непостійність діаметра кулі V_{Dws} (як різницю найбільшого й найменшого одиничного діаметра кулі згідно стандарту) визначали за круглограмами, отриманими у трьох взаємно перпендикулярних перерізах куль на кругломірі мод. МК 300, оснащеному електронними блоком для виводу цифрових даних на персональний комп'ютер [21]. Форм-фактор круглограми кулі обраховували для кожної круглограми за формулою

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

де p_r – довжина кругло грами; A_r – площа фігури в межах контуру круглограми. Середню стандартну похибку вимірювання V_{Dws} обраховували як середнє арифметичне середньозважених стандартних похибок вимірювання V_{Dws} двох куль у трьох перерізах кожної як до проведення дослідів, так і після кожного з восьми дослідів за виключенням результатів, які явно відрізняються серед інших. Середня стандартна похибка вимірювання V_{Dws} склала 0,86 мкм. Аналогічно середню стандартну похибку f_r обраховували як середнє арифметичне середньозважених стандартних похибок f_r двох куль у трьох перерізах кожної як до проведення дослідів, так і після кожного з восьми дослідів. Середня стандартна похибка визначення f_r склала $1,81 \cdot 10^{-3}$.

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 (або, іншими словами, коефіцієнт кривини), для обрахунку яких вимірювали усереднену координату y_m профілю поверхні. За обрахובаними значеннями y_m визначали лінійні й квадратичні лінії тренду $y_r = f(r)$ залежно від радіусу поверхні круга, коефіцієнти яких при відповідно лінійному й квадратичному членах слугували показниками форми зношеної поверхні круга.

Вимірювання координати y_i профілю поверхні круга проводили безпосередньо на верстаті за допомогою індикатора часового типу ИЧ-10 з ціною поділки шкали 0,01 мм, закріпленого на штативі, як описано в [21]. Показник y_m обраховували після безпосереднього вимірювання координати y_i робочої поверхні круга у реперних точках у трьох радіальних напрямках й наступного усереднення. Вісім реперних точок у кожному радіальному напрямку були рівновіддаленими одна від одної, а перша і остання точки знаходилися за 5 мм від осі обертання й зовнішнього краю алмазного шару відповідно. Перший радіальний напрямок вибирали довільно і вже не змінювали його по ходу виконання досліджень. Вимірювання повторювали для інших двох радіальних напрямків, рівновіддалених від першого напрямку і один від одного. Вимірювання виконували до проведення дослідів і після кожного досліді. Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [25], під час обрахунку середніх значень координати y_m їх перевіряли на наявність результатів, що різко виділяються серед інших – дисперсії вибірок перевіряли на однорідність за G -критерієм Кохрена. Якщо перевірка показувала (з довірчою імовірністю 0,95), що вони є однорідними, за найкращу оцінку дисперсії відтворюваності вважали середньозважену дисперсію $S_{\text{відтв}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{відтв}}^2$. Стандартну похибку вимірювання координати y_m обраховували як середнє арифметичне похибок вимірювання y_m початкового профілю круга й після восьми дослідів, які у свою чергу були середнім значенням стандартних похибок вимірювання ко-

ординати y_i в реперних точках. Стандартна похибка вимірювання y_{mi} склала 35,9 мкм.

За обраної схеми шліфування досліджували вплив режиму обробки на уточнення форми керамічних куль й змінювання форми зношеної поверхні алмазного круга. За допомогою повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^3 визначали коефіцієнти впливу режиму обробки: поєднання дискретної подачі круга на врізання s_b , кругової подачі заготовок ω_3 і частоти обертання алмазного круга ω_k . Оскільки ПФЕ містить кінцеву кількість дослідів, він дозволяє отримати лише вибіркові оцінки коефіцієнтів лінійного рівняння, а план 2^3 слід розглядати тоді, коли на меті є виявлення відмінностей, що перевищують подвійну стандартну похибку (тут і далі згідно рекомендацій [25]). План 2^3 передбачав варіювання трьома факторами на наступних двох рівнях: дискретною подачею $s_b - 2 \cdot 10^{-5}$ і $5 \cdot 10^{-5}$ м/5 хв (подачу здійснювали кожні 5 хв – 0,02 і 0,05 мм/5 хв), частотою обертання круга $\omega_k - 104,7$ і $167,6$ с $^{-1}$ ($n_k = 1000$ і 1600 об/хв), частотою подачею куль $\omega_3 - 18,3$ і $28,8$ с $^{-1}$ ($n_3 = 175$ й 275 об/хв). Час проведення кожного дослідів тривав 30 хв.

Розраховані за отриманою моделлю величини позначали прописною літерою Y , а відгуки у дослідях – рядковою літерою y . На відміну від половинних 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, записаних 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 з 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 за допомогою обчислення значення Y за зворотним алгоритмом Йетса, який найбільш просто можна здійснити 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 процес шліфування у сфері експерименту.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті дослідження отримано закономірності змінювання профілю робочої поверхні круга залежно від режиму шліфування керамічних куль як у вигляді сукупності експериментальних точок y_{mi} для реперних значень радіуса r , так і у вигляді ліній тренду утвореної профілю круга, представлених функціями квадратичної регресії (рис. 2).

Функції лінійної та квадратичної регресії, залучені для опису початкового профілю круга, виглядають як $y_{r0} = 8,39 \cdot 10^{-5} r + 50,3$ і $y_{r0} = -7,59 \cdot 10^{-9} x^2 + 1,98 \cdot 10^{-4} x + 47,7$. Такі ж функції після дослідів представлено в табл. 1. Досліди виконували у випадковому порядку, але у табл. 1 вони представлені згідно плану експерименту. Щоб уникнути появи похибки розрахунків через розкид значень y_{mi} для подальшого аналізу спиралися на апроксимовані залежності y_r .

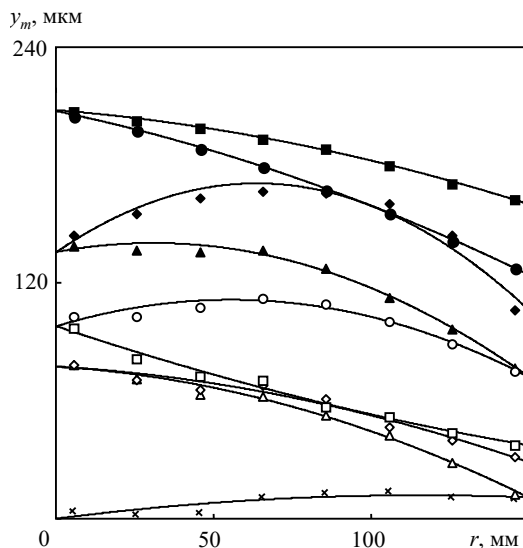


Рис. 2. Змінювання координат початкового (×) профілю й після проведення дослідів 1 (□), 2 (◇), 3 (△), 4 (○), 5 (▲), 6 (◆), 7 (●), 8 (■) у залежності від радіуса r поверхні круга.

Таблиця 1. Функції лінійної й квадратичної регресії змінювання координат профілю круга у радіальному напрямку

№ дослідів	S_B , мм/5 хв	ω_{K1} , с ⁻¹	ω_{31} , с ⁻¹	Лінійна лінія тренду y_r	Квадратична лінія тренду y_r
1	0,02	104,7	18,3	$y_{r1} = -4,06 \cdot 10^{-4}r + 67,7$	$y_{r1} = 1,01 \cdot 10^{-9}r^2 - 5,58 \cdot 10^{-4}r + 71,3$
2	0,05	104,7	18,3	$y_{r2} = -3,27 \cdot 10^{-4}r + 55,6$	$y_{r2} = -1,41 \cdot 10^{-9}r^2 - 1,15 \cdot 10^{-4}r + 50,7$
3	0,02	167,6	18,3	$y_{r3} = -4,12 \cdot 10^{-4}r + 56,8$	$y_{r3} = -2,31 \cdot 10^{-9}r^2 - 3,32 \cdot 10^{-5}r + 48,7$
4	0,05	167,6	18,3	$y_{r4} = -2,09 \cdot 10^{-4}r + 81,8$	$y_{r4} = -4,36 \cdot 10^{-9}r^2 + 4,86 \cdot 10^{-4}r + 66,4$
5	0,02	104,7	28,8	$y_{r5} = -3,33 \cdot 10^{-4}r + 104,5$	$y_{r5} = -4,18 \cdot 10^{-9}r^2 + 2,92 \cdot 10^{-4}r + 89,8$
6	0,05	104,7	28,8	$y_{r6} = -2,04 \cdot 10^{-4}r + 116,1$	$y_{r6} = -8,54 \cdot 10^{-9}r^2 + 1,09 \cdot 10^{-3}r + 85,9$
7	0,02	167,6	28,8	$y_{r7} = -3,2 \cdot 10^{-4}r + 140,3$	$y_{r7} = -1,32 \cdot 10^{-9}r^2 - 1,21 \cdot 10^{-4}r + 135,7$
8	0,05	167,6	28,8	$y_{r8} = -2,59 \cdot 10^{-4}r + 175,0$	$y_{r8} = -1,41 \cdot 10^{-9}r^2 - 3,47 \cdot 10^{-4}r + 170,1$

Усереднені значення непостійності діаметра кулі V_{Dws} , розраховані значення кута нахилу λ , коефіцієнта k_p , форм-фактора f_r у дослідях представлено в табл. 2, 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.

Коефіцієнти лінійної моделі для кожного показника обчислено за алгоритмом Йетса. Результати обчислень представлено в табл. 3–6, позначення ефектів наведено лише в табл. 3 в останньому стовпчику (в табл. 4–6 ці позначення не наведено).

Стандартна похибка контраст-сум стовпчика (3) табл. 3 для V_{Dws} була розрахована на основі стандартної похибки вимірювання, тобто $0,86 \text{ мкм} \cdot \sqrt{8} = 2,43 \text{ мкм}$, а стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика – $0,86 \text{ мкм} / \sqrt{8} = 0,3 \text{ мкм}$. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів – $0,6 \text{ мкм}$.

Таблиця 2. Показники точності форми куль й форми зношеної поверхні круга

Позначення досліджу	Показники точності форми куль		Показники форми поверхні круга	
	V_{Dws} , мкм	f_r	$\lambda \cdot 10^{-4}$, рад	$k_p \cdot 10^{-9}$, мкм ⁻¹
(1)	43,8	1,02318	-4,060	1,012
<i>a</i>	42,5	1,02128	-3,268	-1,414
<i>b</i>	34,0	1,02502	-4,119	-2,307
<i>ab</i>	33,9	1,00626	-2,085	-4,360
<i>c</i>	21,8	0,99998	-3,330	-4,182
<i>ac</i>	21,3	1,00089	-2,040	-8,542
<i>bc</i>	14,2	0,99650	-3,196	-1,324
<i>abc</i>	17,9	1,01840	-2,589	-1,414

Таблиця 3. Обчислення коефіцієнтів моделі непостійності діаметра кулі V_{Dws}

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³	Позначення ефекту
(1)	43,8	86,3	154,1	229,3	28,7	<i>T</i>
<i>a</i>	42,5	67,8	75,2	1,8	0,2	<i>A</i>
<i>b</i>	34,0	43,1	-1,4	-29,4	-3,7	<i>B</i>
<i>ab</i>	33,9	32,1	3,2	5,4	0,7	<i>AB</i>
<i>c</i>	21,8	-1,3	-18,5	-78,9	-9,9	<i>C</i>
<i>ac</i>	21,3	-0,1	-11,0	4,7	0,6	<i>AC</i>
<i>bc</i>	14,2	-0,5	1,2	7,5	0,9	<i>BC</i>
<i>abc</i>	17,9	3,7	4,2	3,0	0,4	<i>ABC</i>

Таблиця 4. Обчислення коефіцієнтів моделі форм-фактора f_r

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	1,02318	2,04446	4,07574	8,09151	1,01144
<i>a</i>	1,02128	2,03128	4,01577	0,00213	0,00027
<i>b</i>	1,02502	2,00087	-0,02068	0,00086	0,00011
<i>ab</i>	1,00626	2,01490	0,02281	0,00413	0,00052
<i>c</i>	0,99998	-0,00191	-0,01318	-0,05997	-0,00750
<i>ac</i>	1,00089	-0,01877	0,01404	0,04349	0,00544
<i>bc</i>	0,99650	0,00091	-0,01686	0,02722	0,00340
<i>abc</i>	1,01840	0,02190	0,02099	0,03785	0,00473

Як видно з табл. 3, більшість виявлених відмінностей V_{Dws} (за виключенням відмінностей *A* і *ABC*) перевищують подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів і за попередньою оцінкою є реальними, водночас відмінність *ABC* попадає у сумнівну область – вона перевищує її очікувану стандартну похибку, але менша за її подвоєне значення.

Аналогічно було розраховано стандартну похибку контраст-сум стовпчика (3) (див. табл. 4) для f_r , стандартну похибку регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика і, як наслідок, подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів f_r , яка склала $1,28 \cdot 10^{-3}$. Як видно з табл. 4, більшість виявлених відмінностей f_r (за виключенням відмінностей A , B і AB) перевищують подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів і за попередньою оцінкою є реальними, водночас відмінність AB попадає у сумнівну область – вона перевищує її очікувану стандартну похибку, але менша за її подвоєне значення.

Таблиця 5. Обчислення коефіцієнтів моделі кута нахилу λ

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	-4,060	-7,327	-13,530	-24,687	-3,086
<i>a</i>	-3,268	-6,203	-11,156	4,722	0,590
<i>b</i>	-4,119	-5,371	2,826	0,709	0,089
<i>ab</i>	-2,085	-5,786	1,897	0,560	0,070
<i>c</i>	-3,330	0,792	1,124	2,374	0,297
<i>ac</i>	-2,040	2,034	-0,415	-0,929	-0,116
<i>bc</i>	-3,196	1,290	1,242	-1,539	-0,192
<i>abc</i>	-2,589	0,607	-0,682	-1,925	-0,241

Примітка. У таблиці подано значення $\lambda \cdot 10^{-4}$, рад.

Таблиця 6. Обчислення коефіцієнтів моделі коефіцієнта k_p

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	1,012	-0,402	-7,069	-22,531	-2,816
<i>a</i>	-1,414	-6,667	-15,462	-8,929	-1,116
<i>b</i>	-2,307	-12,724	-4,479	3,721	0,465
<i>ab</i>	-4,360	-2,738	-4,450	4,643	0,580
<i>c</i>	-4,182	-2,426	-6,265	-8,393	-1,049
<i>ac</i>	-8,542	-2,053	9,986	0,029	0,004
<i>bc</i>	-1,324	-4,360	0,373	16,251	2,031
<i>abc</i>	-1,414	-0,090	4,270	3,897	0,487

Примітка. У таблиці подано значення $k_p \cdot 10^{-9}$, мкм⁻¹.

Середня стандартна похибка λ була розрахована на основі стандартної похибки вимірювання u_m як $\arctg(35,9 \text{ мкм}/140000 \text{ мкм}) = 2,56 \cdot 10^{-4}$, де 140 мм є відстань між першою й останньою точками вимірювання. Тоді стандартна похибка контраст-сум стовпчика (3) табл. 5 буде дорівнювати $2,56 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{8} = 7,24 \cdot 10^{-4}$, а стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика $-2,56 \cdot 10^{-4} / \sqrt{8} = 9,05 \cdot 10^{-5}$. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів λ є $1,81 \cdot 10^{-4}$. Як видно з табл. 5 половина виявлених відмінностей λ (за виключенням B , AB , AC і BC) перевищують подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів і за попередньою оцінкою є реальними.

Середня стандартна похибка k_p була розрахована також на основі стандартної похибки вимірювання u_m як середнє арифметичне різниці ($k_p - k_{pc}$) для

початкового профілю круга й у кожному досліді, де $k_{pc} = k_{p \max}$ якщо $k_p < 0$ і $k_{pc} = k_{p \min}$ якщо $k_p > 0$. Коефіцієнти $k_{p \max}$ і $k_{p \min}$ отримані після апроксимації експериментальних координат профілю круга, коригованих у трьох перших і трьох останніх реперних точках на величину $0,5u_m$ у бік зменшення ($k_{p \max}$) або збільшення ($k_{p \min}$). Стандартна похибка k_p склала $2,33 \cdot 10^{-9}$. Звідси після аналогічних розрахунків подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів $k_p \in 1,65 \cdot 10^{-9} \text{ мкм}^{-1}$. У табл. 6 більшість виявлених відмінностей k_p (за виключенням відмінності AC) перевищують подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів, відмінність AC є меншою за стандартну похибку.

Загальновідомо, що у задачах інтерполяції математична модель має адекватно описувати об'єкт у сфері експерименту з бажано більшою деталізацією досліджуваних ефектів й у певних межах може бути нелінійною за рахунок спільного впливу головних ефектів і взаємодії факторів. Перевірка коефіцієнтів отриманих моделей за критерієм Стюдента показала наступне. За довірчої ймовірності $p = 95 \%$ ($t_{c 95; 7} = 2,3646$) у моделі змінювання непостійності діаметра кулі V_{Dws} статистично значимим є вплив головних ефектів B і C . А модель змінювання форм-фактора f_r має статистично значимий вплив головного ефекту C і взаємодії факторів AC і ABC . За довірчої ймовірності $p = 90 \%$ ($t_{c 90; 7} = 1,8946$) у моделі змінювання кута нахилу λ статистично значимим є вплив головних ефектів A і C , а модель змінювання коефіцієнта k_p має статистично значимий вплив головних ефектів A , C і взаємодії факторів BC .

Оскільки коефіцієнти регресії моделей змінювання f_r і k_p відображають статистично значимий вплив як головних ефектів, так і взаємодій факторів, перевіряли спільний вплив означених ефектів та взаємодій з використанням зворотного алгоритму Йетса [25]. Іноді виявляється, що відгуки в точках, розташованих у деякій частині факторного простору, дуже великі (або дуже маленькі), тоді як значення відгуків в інших точках невиразні.

Статистична значимість впливу на змінювання f_r взаємодій AC і ABC поряд з таким же впливом головного ефекту C свідчить про зростання в деякій частині факторного простору впливу ефектів A , B і C . Тому перевіряли, чи призводить спільний вплив головного ефекту і взаємодій до відгуків, які є наближеними до одиниці з точністю $\pm 0,005$ в певній частині досліджуваного факторного простору. Знайдено середні відгуки для взаємодій AB , AC і BC (табл. 7–9). Так, ліворуч у табл. 7 наведено вісім спостережених значень, згрупованих у двовимірну таблицю $A \times C$. Праворуч ті ж дані показані усередненими попарно. Подібним способом отримана табл. 8. Незавжди пересвідчилися, що для взаємодії AB середні відгуки дають невиразні результати.

Таблиця 7. Обчислення середніх відгуків взаємодій AC для форм-фактора f_r

	–	A		A	
	1,023185 1,025024	1,021276 1,006257		1,024104 1,013766	за середнього значення 1,011439
C	0,999978 0,996502	1,000887 1,018402	C	0,998240 1,009645	

Отже, сприятливим для наближення значення f_r до одиниці є лише спільний вплив головного ефекту C і взаємодій AC та BC , причому за умови, коли ефект C наближається до верхнього рівня, а ефекти A і B зменшуються, а інші комбінації змінювання ефектів дають невиразні результати. Тож за умов, коли у взаємодіях ефект C знаходиться на верхньому (+1) рівні, а ефект A – на нижньому (–1), лінійне рівняння змінювання f_r матиме вигляд

$$f_r|_{A-B-} = 8,09151 - 0,05997x_3 + 0,04349x_1|_{A-x_3|_{C+}} + 0,03785x_1|_{A-x_2x_3|_{C+}} = 8,04802 - 0,03785x_2 - 0,05997x_3.$$

Таблиця 8. Обчислення середніх відгуків взаємодій BC для форм-фактора f_r

	–	B		B	
–	1,023185	1,025024	C	1,022230	1,015640
	1,021276	1,006257			
C	0,999978	0,996502		1,000433	1,007452
	1,000887	1,018402			

за середнього значення 1,011439

Оскільки статистично значимим для змінювання k_p є вплив головних ефектів A , C і двофакторної взаємодії BC , перевіряли, чи призводить вплив взаємодії до екстремального відгуку (табл. 9).

Таблиця 9. Обчислення середніх відгуків взаємодій BC для коефіцієнта k_p

	–	B		B	
–	$1,01 \cdot 10^{-9}$	$-4,18 \cdot 10^{-9}$	C	$-0,2 \cdot 10^{-9}$	$-6,36 \cdot 10^{-9}$
	$-1,41 \cdot 10^{-9}$	$-8,54 \cdot 10^{-9}$			
C	$-2,31 \cdot 10^{-9}$	$-1,32 \cdot 10^{-9}$		$-3,34 \cdot 10^{-9}$	$-1,37 \cdot 10^{-9}$
	$-4,36 \cdot 10^{-9}$	$-1,41 \cdot 10^{-9}$			

за середнього значення $-2,82 \cdot 10^{-9}$

Отже лише спільний вплив головних ефектів A , C і взаємодії BC причому за умов, коли ефекти B і C зменшуються, є сприятливим для зменшення значення k_p , а інші комбінації змінювання ефектів дають невиразні результати. Отже лінійне рівняння змінювання k_p матиме вигляд:

$$k_p|_{B-} = -22,531 \cdot 10^{-9} - 8,929 \cdot 10^{-9}x_1 - 8,393 \cdot 10^{-9}x_3 + 16,251 \cdot 10^{-9}x_2|_{B-x_3} = -22,531 \cdot 10^{-9} - 8,929 \cdot 10^{-9}x_1 - 24,644 \cdot 10^{-9}x_3.$$

З огляду на результати перевірки спільного впливу факторів, дотримувалися гіпотези, що ці показники процесу можуть бути описані лінійним моделями, які слід перевірити на адекватність.

Обчислення значень Y за отриманими моделями здійснили за допомогою зворотного алгоритму Йетса, перевірку на адекватність – за F -критерієм Фішера, порівнюючи його для V_{DwL} і f_r з табличним значенням $F_{(0,05, 6, 40)} = 2,34$, для λ і k_p – з $F_{(0,05, 6, 16)} = 2,74$. Результати обчислень представлено в табл. 10–13.

Таблиця 10. Обчислення значень Y за моделлю для непостійності діаметра кулі V_{Dws}

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³	Позначення досліду
<i>ABC</i>	0	0	-78,9	120,9	15,1	<i>abc</i>
<i>BC</i>	0	-78,9	199,8	120,9	15,1	<i>bc</i>
<i>AC</i>	0	-29,4	-78,9	179,8	22,5	<i>ac</i>
<i>C</i>	-78,9	229,3	199,8	179,8	22,5	<i>c</i>
<i>AB</i>	0	0,0	-78,9	278,8	34,8	<i>ab</i>
<i>B</i>	-29,4	-78,9	258,7	278,8	34,8	<i>b</i>
<i>A</i>	0	-29,4	-78,9	337,6	42,2	<i>a</i>
<i>T</i>	229,3	229,3	258,7	337,6	42,2	(1)

Таблиця 11. Обчислення значень Y за моделлю для форм-фактора f_r

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	-0,05997	7,95020	0,99378
<i>BC</i>	0	-0,05997	8,01017	7,95020	0,99378
<i>AC</i>	0	-0,03785	-0,05997	8,02590	1,00324
<i>C</i>	-0,05997	8,04802	8,01017	8,02590	1,00324
<i>AB</i>	0	0,0	-0,05997	8,07014	1,00877
<i>B</i>	-0,03785	-0,05997	8,08587	8,07014	1,00877
<i>A</i>	0	-0,03785	-0,05997	8,14584	1,01823
<i>T</i>	8,04802	8,04802	8,08587	8,14584	1,01823

Таблиця 12. Обчислення значень Y за моделлю для кута нахилу λ

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	2,374	-17,590	-2,199
<i>BC</i>	0	2,374	-19,964	-27,035	-3,379
<i>AC</i>	0	0	2,374	-17,590	-2,199
<i>C</i>	2,374	-19,964	-29,409	-27,035	-3,379
<i>AB</i>	0	0	2,374	-22,338	-2,792
<i>B</i>	0	2,374	-19,964	-31,783	-3,973
<i>A</i>	4,722	0	2,374	-22,338	-2,792
<i>T</i>	-24,687	-29,409	-29,409	-31,783	-3,973

Отримані лінійні моделі змінювання показників з кодованими значеннями факторів мають наступний вигляд:

$$V_{DwL} = 28,7 - 3,7x_2 - 9,9x_3;$$

$$f_r = 1,006 - 0,00473x_2 - 0,0075x_3;$$

$$\lambda = -3,086 \cdot 10^{-4} + 5,9 \cdot 10^{-5}x_1 + 2,97 \cdot 10^{-5}x_3;$$

$$k_p = -2,816 \cdot 10^{-9} - 1,116 \cdot 10^{-9}x_1 - 3,081 \cdot 10^{-9}x_3,$$

або з натуральними значеннями факторів (тут s_B слід застосовувати в міліметрах)

$$V_{DwL} = 88,8 - 0,11698\omega_K - 1,87937\omega_3;$$

$$f_r = 1,06011 - 0,00015\omega_K - 0,00143\omega_3;$$

$$\lambda = -5,794 \cdot 10^{-4} + 3,935 \cdot 10^{-3}s_B + 5,653 \cdot 10^{-6}\omega_3;$$

$$k_p = 1,361 \cdot 10^{-8} - 7,441 \cdot 10^{-8}s_B - 5,868 \cdot 10^{-10}\omega_3.$$

Таблиця 13. Обчислення значень Y за моделлю для коефіцієнту k_p

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	-24,644	-56,104	-7,013
<i>BC</i>	0	-24,644	-31,460	-38,246	-4,781
<i>AC</i>	0	0	-24,644	-56,104	-7,013
<i>C</i>	-24,644	-31,460	-13,602	-38,246	-4,781
<i>AB</i>	0	0	-24,644	-6,816	-0,852
<i>B</i>	0	-24,644	-31,460	11,042	1,380
<i>A</i>	-8,929	0	-24,644	-6,816	-0,852
<i>T</i>	-22,531	-13,602	-13,602	11,042	1,380

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

У досліджуваній схемі шліфування куль за базування у кільцевій канавці V-подібного профілю й круговою подачею з коливанням мінімальні значення непостійності діаметра кулі V_{DwL} знижуються до області 14,2–17,9 мкм, тобто означена схема шліфування є більш сприятливою для зниження V_{DwL} , аніж схема шліфування куль за базування на площині й круговою подачею з коливанням [22], де мінімальні значення V_{DwL} сягали області 26–29 мкм. За досліджуваної схеми шліфування згадані значення V_{DwL} (рис. 3, а, область 1), як і значення f_r в межах $1,000 \pm 0,005$ (рис. 3, б, область 2) слід очікувати за умови одночасного підвищення частоти обертання круга ω_K й кругової подачі куль ω_3 до області 1.

Якщо зношування алмазного круга під час шліфування керамічних куль оцінювати розмахом змінювання координат профілю ($y_{\max} - y_{\min}$), то значення цього показника коливається по ходу проведення дослідів в межах 37–78 мкм (див. рис. 2). Аналогічні розрахунки, проведені за результатами [22], показують, що за схеми шліфування куль за базування на площині й круговою подачею з коливанням значення розмаху ($y_{\max} - y_{\min}$) коливається в межах 115–150 мкм.

Разом з тим певного вирівнювання зносу шліфувального круга, тобто змінювання кута нахилу в області $\lambda < -1'$ слід очікувати за умови одночасного змінювання подачі алмазного круга на врізання s_B і кругової подачі куль ω_3 в області 1, а досягнення коефіцієнтом кривини k_p значень $k_p \in \pm 10^{-9}$ – в області 2 (рис. 4).

Отже, зменшенню V_{DwL} до 15–21 мкм й одночасно досягненню значень f_r в межах $1,000 \pm 0,005$ за досліджуваної схеми шліфування сприяє підвищення в межах дослідженого діапазону кінематичних параметрів режиму обробки,

однак певного вирівнювання зносу шліфувального круга по профілю слід очікувати навпаки за умови певного зниження режиму обробки.

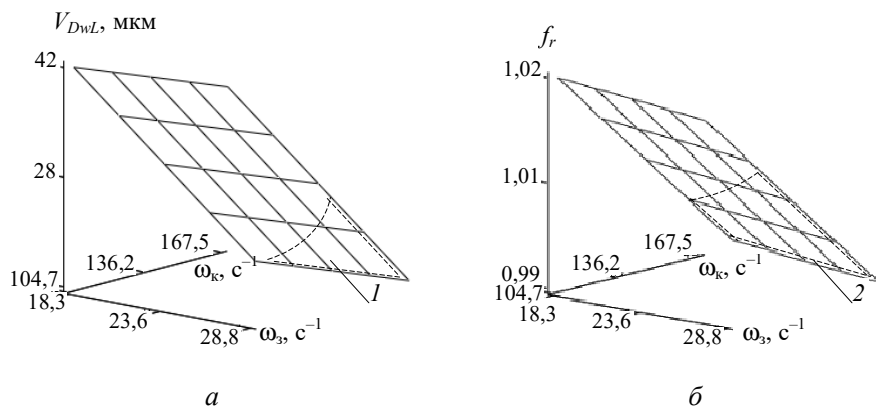


Рис. 3. Моделювання змінювання V_{DwL} (а) і f_r (б) залежно від режиму обробки: області значень $V_{DwL} = (19-21)$ мкм (1) і $f_r = 1,000 \pm 0,005$ (2).

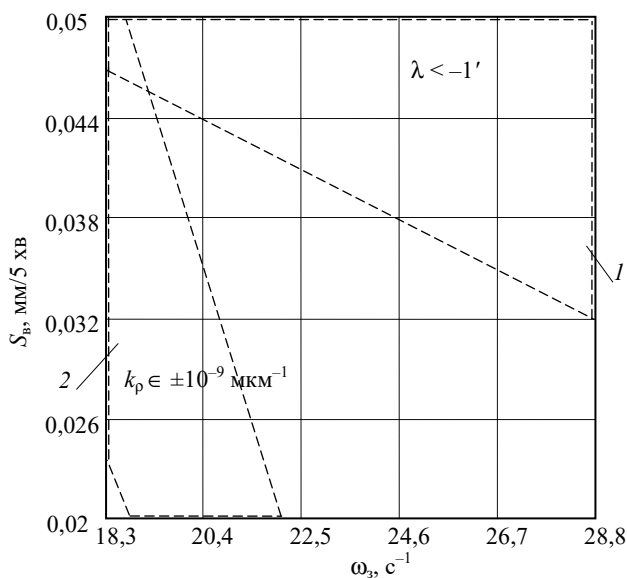


Рис. 4. Области змінювання подачі алмазного круга на врізання s_B й кругової подачі куль ω_3 , за яких показники форми круга λ і k_p не перевищують обумовлені значення.

ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження впливу режиму алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію за базування у кільцевій канавці V-подібного профілю й круговою подачею з коливанням на точність форми керамічних куль й змінювання форми зношеної поверхні алмазного круга показано, що означений вплив адекватно описують лінійні залежності обраних показників процесу від параметрів режиму обробки: подачі шліфувального круга на врізання, частоти обертання круга й кругової подачі куль.

Для досліджуваної схеми шліфування куль визначено області змінювання параметрів режиму обробки, за яких значення непостійності діаметра кулі зменшується до 14,2–17,9 мкм й одночасно значення форм-фактора круглограм коливається в межах $1,000 \pm 0,005$, а також кут нахилу лінії профілю робочої поверхні круга у радіальному напрямку не перевищує -1° , а коефіцієнт кривини лінії профілю коливається в межах $\pm 10^{-9}$.

ФІНАНСУВАННЯ

Дана робота не фінансувалася із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

S. V. Sokhan', V. V. Voznyy, V. H. Sorochenko
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Diamond grinding of ceramic balls in an annular groove
and circular feed with oscillation

In article, for diamond grinding of ceramic balls made of silicon nitride based in an annular groove and a circular feed with oscillation of one, the results of an experimental study of the effect of the processing mode on the wear of the surface of the diamond wheel and the accuracy of the shape of the balls are presented. The indicators of the accuracy of the shape of the grinded balls – were the variation of the ball diameter and the form factor of out-of-roundness ball profile and the wear of the wheel surface – the angle of inclination of the working surface in the radial direction and the curvature coefficient. The specified influence of the grinding conditions is described by adequate linear functions: the variation of the ball diameter and the form factor of the out-of-roundness ball profile – from its rotation frequency of the wheel and circular feed of balls, the angle of inclination of the wheel profile and the curvature coefficient of its profile - from the depth feed of the wheel and circular feed of balls. Combinations of grinding parameters were determined within the studied range of changes, which are the basis for the subsequent optimization.

Keywords: ceramic balls from silicon nitride, grinding conditions, variation of ball diameter, form factor of out-of-roundness ball profile, wear of the 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 RW, 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 Proc.: Mater*. 2022. Vol. 15, no. 3, art. 1227.
7. He C., Zhang J., Geng K., Wang Sh., Luo M., Zhang X., Ren Ch. Advances in ultra-precision machining of bearing rolling elements. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 2022. Vol. 122. P. 3493–3524.
8. Pedroso M.P.G., 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. The ball grinding machine from Friedrich Fischer was patented 125 years ago. <https://www.pressebox.com/pressrelease/schaeffler-technologies-ag-co-kg/The-ball-grinding-machine-from-Friedrich-Fischer-was-patented-125-years-ago/boxid/760392>
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. Pedrosa 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. Lvu 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. Mech. 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 Si_3N_4 balls for bearing applications. *Wear*. 1998. Vol. 215, nos.1–2. P. 267–278.
19. Пасечный 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., Hamaniuk M.P. Diamond grinding of ceramic balls in an annular groove. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 2. P. 143–153.
24. Кононюк А.Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента): В 4 т. Т. 2. Киев: Изд-во КНТ, 2011. 453 с.

Надійшла до редакції 29.05.24

Після доопрацювання 03.10.24

Прийнята до опублікування 10.10.24