

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 базуюванням на площині й круговою подачею з коливанням

Для алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію з базуюванням на площині й круговою подачею з коливанням представлено результати експериментального дослідження впливу схеми базуювання куль й режиму обробки на точність форми куль й форму зношеної поверхні алмазного круга. Показниками точності форми шліфованих куль були непостійність діаметра кулі й форм-фактор круглограни кулі, а форми зношеної поверхні круга – кут нахилу робочої поверхні у радіальному напрямку й коефіцієнт кривини. Означений вплив описано адекватними лінійними функціями: непостійності діаметра кулі – від подачі круга на врізання й частоти його обертання, форм-фактора круглограни – від частот обертання круга й стола з кулями, кута нахилу профілю круга й коефіцієнта кривини його профілю – від подачі круга на врізання й частоти обертання стола з кулями. Спрогнозовано значення параметрів 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 круглограни, форма зношеної поверхні круга.

ВСТУП

Сучасні керамічні кулі мають оптимальне поєднання властивостей для задоволення таких вимог, як у тіл кочення у високоточних гібридних підшипниках (зі сталевим внутрішнім і зовнішнім кільцями) і повністю керамічних підшипниках [1]. Перевагою гібридних підшипників [2–4] є підвищення експлуатаційних характеристик (теплостійкості, надійності й терміну служби) завдяки збереженню механічних властивостей за високих температур, високій зносо- і корозійній стійкості. Вказані властивості не лише зменшують тертя, але й через меншу вібрацію забезпечують швидкість до 80 % вище, ніж підшипники з металевими кулями; низька щільність кераміки знижує енергоспоживання на 15–20 % у порівнянні з підшипниками з металевими кулями [5], а переважання стискаючих напружень на тілах кочення дозволяє максимально використовувати механічні властивості кераміки. Постійне удосконалення власне самих керамічних композиційних матеріалів потребує й неодмінного удосконалення технології їхньої алмазної обробки [6].

Огляд світового досвіду удосконалення 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, а саме: обробку між двома [10–11] або трьома дисками [12–13] у канавці V-подібного профілю,

між двома дисками у ексцентричній [14–15] чи спіральній [16–17] канавці того ж профілю. В інших методах шліфування канавку V-подібного профілю не використовують [18–19].

Задачею алмазного формоутворювального шліфування заготовок керамічних куль є надання останнім сферичної форми для наступного уточнення цієї форми алмазним доведенням. Цілком очевидно, що підвищення точності формоутворення сферичної поверхні кулі шліфуванням сприяє зменшенню витрат часу на алмазне доведення.

В Інституті надтвердих матеріалів НАН України розроблено й запатентовано спосіб шліфування куль з високотвердої кераміки торцем алмазного круга [20], під час якого вільно обертові заготовки куль утримуються на площині обертового стола верстата завдяки притисненню оберненими до стола конусними поверхнями пристрою. Обробку здійснюють саме тієї частини заготовок, яка виступає над кільцевим пазом, утвореним крайками конусних поверхонь. У [21] така схема базування куль використана авторами для дослідження зношування круга залежно від схеми перекриття ним траєкторії подачі куль й режиму обробки. Однак за обробки заготовок розміром менше 12 мм кут загострення крайок центрального диска й притискного кільця зменшується як і жорсткість останніх, тому втрачається основна функція крайок утримувати вільно обертові кулі під час їхньої обробки.

Для шліфування заготовок керамічних куль розміром < 12 мм в [22] застосовано схему шліфування торцем алмазного круга з базуванням на площину й круговою подачею куль без виходу за край круга. Під час шліфування вільно обертові заготовки куль, які розміщують в наскрізних отворах також вільно обертового сепаратора, 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 заготовками куль, які штовхають сепаратор у напрямку свого руху. Базування заготовок куль у кільцевій канавці V-подібного профілю під час шліфування, як показано в [23], дозволяє впливати на зношування круга варіюванням режимів обробки й сприяє зменшенню до певної міри похибок форми заготовок.

Недоліком процесів шліфування за базування куль на одно- або двоточковий контакт і круговою подачею, застосованих у [22–23], 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.

Зменшити негативний вплив обох чинників дозволяє введення у запропонованому технологічному пристрої регульовального зміщення на певний ексцентриситет планшайби із співвісним з нею вільно обертовим сепаратором із заготовками куль відносно осі обертання стола пристрою (див. рис. 1, б). Наявність цього 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 віль-

но обертової кулі та її прагненню зайняти положення своїм більшим розміром у напрямку назустріч поверхні алмазного круга. Наслідком руху куль за подовженою епіциклоїдою ϵ , за певного режиму обробки, вирівнювання форми зношуваної поверхні круга, а коливання відцентрової сили впливає на зменшення несферичності оброблюваних куль.

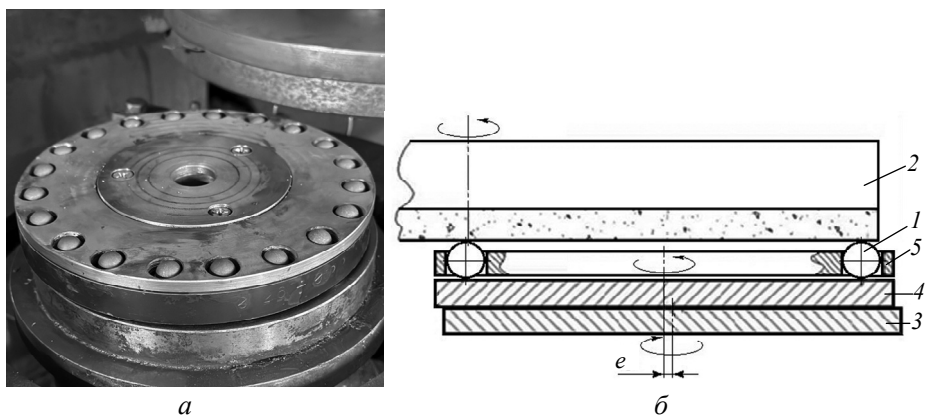


Рис. 1. Налаштування технологічного пристрою з ексцентриситетом планшайби (а) і схема базування куль на площині (б): 1 – оброблювані кулі; 2 – алмазний круг; 3 – обертовий стіл пристрою; 4 – планшайба; 5 – сепаратор.

Наразі не досліджено закономірності впливу зазначених умов шліфування й режиму обробки на точність форми керамічних куль й змінювання форми зношуваної поверхні круга. Тому метою даного дослідження було встановлення закономірностей алмазного шліфування куль торцем круга з їхнім базуванням на площині та круговою подачею з коливанням.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Алмазне шліфування заготовок керамічних куль з нітриду кремнію проводили на фрезерному верстаті мод. 6Т12 із 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 планшайби з сепаратором та кулями – на рис. 1, б. Як показано на схемі розташування, плоско-паралельна планшайба 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 однією точкою на площину планшайби, 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 досліджах 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. Таким способом забезпечували невихід куль за межі круга з одного боку й відсутність ділянок на поверхні круга, які б не контактували з оброблюваними кулями, з іншого.

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 заготовок 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 . Точність форми керамічних куль оцінювали, як і у [22–23], показником непостійності діаметра кулі, який вказує на максимальну різницю у поточних діаметрах кулі, й 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 без будь-якої їхньої фільтрації з кроком у один градус повороту і наступному використанні отриманого масиву для комп'ютерної візуалізації в якості круглограми й розрахунку форм-фактора. Останній дозволяє кількісно оцінити співвідношення довжини круглограми й площі, охопленої лінією профілю кулі, і його використовували виключно для порівняння отриманих результатів між собою.

Показниками форми зношеної поверхні алмазного круга були кут нахилу λ 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. За обрахованими значеннями y_m визначали лінійні й квадратичні лінії тренда $y_r = f(r)$ залежно від радіуса поверхні круга, в яких коефіцієнти відповідно лінійної й квадратичної складових слугували показниками форми зношеної поверхні круга.

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 модернізованому кругломірі мод. МК 300, оснащеному електронними блоком для виводу і запису цифрових даних на персональний комп'ютер [22]. Форм-фактор круглограми кулі обраховували для кожної круглограми за формулою $f_r = p_r^2 / 4\pi A_r$, де p_r – довжина круглограми; 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 відрізнялися серед інших. Середня стандартна похибка вимірювання V_{Dws} склала 1,21 мкм. Середню стандартну похибку f_r обраховували аналогічно 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 $3,71 \cdot 10^{-3}$.

Вимірювання координати y_i профілю поверхні круга проводили безпосередньо на верстаті за допомогою індикатора часового типу ІЧ-10 з ціною поділки шкали 0,01 мм, закріпленого на штативі, як описано у [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 відповідно від осі обертання й зовнішнього краю алмазного шару. 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 і після проведення кожного дослід. Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [24], 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 $S_{\text{відтв}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{відтв}i}^2$. Стандартну похибку вимі-

рювання 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 координати y_i у реперних точках. Стандартна похибка вимірювання y_{mi} склала 25,9 мкм. Середню стандартну похибку λ обраховували на основі стандартної похибки вимірювання y_m як $25,9 \text{ мкм} / 140000 \text{ мкм} = 1,9 \cdot 10^{-4}$, де 140 мм є відстань між першою й останньою точками вимірювання. Середню стандартну похибку k_p було розраховано також на основі стандартної похибки вимірювання y_m як середнє арифметичне різниці $k_p - k_{pc}$ для початкового профілю круга й у кожному досліді, де $k_{pc} = k_{p \max}$, якщо $k_p < 0$ й $k_{pc} = k_{p \min}$, якщо $k_p > 0$. Коефіцієнти $k_{p \max}$ й $k_{p \min}$ отримані після апроксимації експериментальних координат профілю круга, коригованих у трьох перших і трьох останніх реперних точках на $0,5y_m$ у бік зменшення ($k_{p \max}$) або збільшення ($k_{p \min}$). Стандартна похибка k_p склала $1,84 \cdot 10^{-3}$.

Під час шліфування за обраною схемою базування й круговою подачею з колюванням куль 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 режимів обробки: дискретної подачі круга на врізання s_b , частоти кругової подачі заготовок ω_3 і частоти обертання алмазного круга ω_k . План ПФЕ типу 2^3 обрано для виявлення відмінностей, що перевищують подвійну стандартну похибку (тут і далі згідно рекомендацій [24]), й дозволяє отримати лише вибірккові оцінки коефіцієнтів лінійного рівняння, оскільки він містить кінцеву кількість дослідів. Рівні варіювання трьома факторами були наступними: дискретної подачі $s_b - 2 \cdot 10^{-5}$ і $5 \cdot 10^{-5}$ м/5 хв (подачу здійснювали кожні 5 хв – 0,02 й 0,05 мм/5 хв), частоти обертання круга $\omega_k - 104,7$ і $167,6 \text{ с}^{-1}$ ($n_k = 1000$ й 1600 об/хв), частоти кругової подачі $\omega_3 - 18,3$ і $28,8 \text{ с}^{-1}$ ($n_3 = 175$ й 275 об/хв). Час проведення кожного дослід – 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. Ефекти факторів позначали прописними літерами. Суму восьми відгуків позначали прописною літерою T . Під час обчислення коефіцієнтів лінійної моделі для зручності операцій над результатами ПФЕ скористалися алгоритмом Йетса у

вигляді таблиці, до якої їх вносили у стовпчик (0). На першій операції алгоритму результати дослідів зі стовпчика (0) спочатку попарно додавали, а потім – попарно віднімали, причому верхнє число віднімали 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 отримано діленням результатів стовпчика (3) на кількість дослідів. Адекватність математичних моделей перевіряли за F -критерієм Фішера за допомогою обчислення значення Y за зворотним алгоритмом Йетса, згідно з яким ефекти записували у зворотному порядку, виконували той же набір додавань і віднімань та зчитували передбачені значення у порядку, зворотному звичайному. У такий спосіб отримано рівняння математичних моделей досліджуваних показників, які адекватно описували вплив режимів обробки.

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 тренда координат профілю зношеного круга, представлених функціями квадратичної регресії (рис. 2).

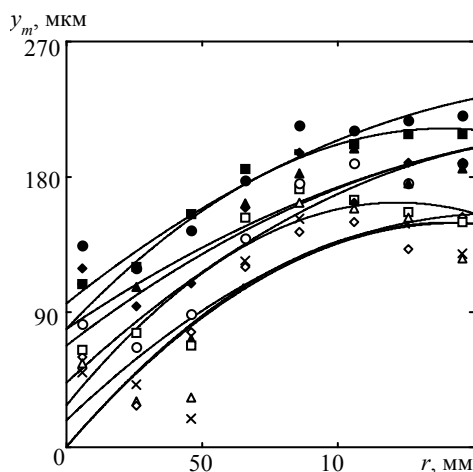


Рис. 2. Змінювання положення експериментальних (символи) й апроксимованих (суцільні лінії) координат початкового (х) профілю й після проведення дослідів 1–8 у залежності від радіуса r поверхні круга: 1 ($\triangle$), 2 ($\diamond$), 3 ($\square$), 4 ($\circ$), 7 ($\blacktriangle$), 8 ($\blacklozenge$), 5 ($\blacksquare$), 6 ($\bullet$).

Функції лінійної та квадратичної регресії, залучені для опису початкового профілю круга, мають вид $y_{r0} = 0,9899r - 26,884$ і $y_{r0} = -0,00757x^2 + 2,126x + 0,184$. Такі ж функції після дослідів представлено у табл. 1. Досліди виконували у випадковому порядку, але у табл. 1 вони представлені згідно плану експерименту. Для уникнення появи похибки розрахунків через розкид значень y_{mi} , у подальшому використовували апроксимовані залежності y_r .

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

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

Дослід	S_B , мм/5 хв	ω_K , с ⁻¹	ω_3 , с ⁻¹	Лінійна залежність тренда y_r	Квадратична залежність тренда y_r
1	0,02	104,7	18,3	$y_{r1}=0,98810r+27,1$	$y_{r1}=-0,007262r^2+2,0774r+1,5$
2	0,05	104,7	18,3	$y_{r2}=0,91566r+37,3$	$y_{r2}=-0,005484r^2+1,7384r+18,0$
3	0,02	167,6	18,3	$y_{r3}=0,84583r+59,9$	$y_{r3}=-0,008943r^2+2,1874r+28,4$
4	0,05	167,6	18,3	$y_{r4}=1,04167r+58,1$	$y_{r4}=-0,004315r^2+1,6890r+42,9$
5	0,02	104,7	28,8	$y_{r5}=0,87530r+79,8$	$y_{r5}=-0,003412r^2+1,3871r+67,7$
6	0,05	104,7	28,8	$y_{r6}=0,80542r+88,4$	$y_{r6}=-0,002778r^2+1,2222r+78,6$
7	0,02	167,6	28,8	$y_{r7}=0,88292r+103,1$	$y_{r7}=-0,006900r^2+1,9180r+78,7$
8	0,05	167,6	28,8	$y_{r8}=0,90875r+108,2$	$y_{r8}=-0,003567r^2+1,4438r+95,6$

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

Дослід	Показники точності форми куль		Показники форми зношеного круга	
	V_{Dws} , МКМ	f_r	λ , рад	k_p
(1)	30,7	1,0000080	0,77941	-0,007262
<i>a</i>	48,6	1,0318299	0,74140	-0,005484
<i>b</i>	28,5	0,9994988	0,70207	-0,008943
<i>ab</i>	53,2	1,0325677	0,80581	-0,004315
<i>c</i>	33,5	0,9968246	0,71900	-0,003412
<i>ac</i>	55,0	0,9950722	0,67804	-0,002778
<i>bc</i>	25,9	1,0018647	0,72330	-0,006900
<i>abc</i>	29,0	1,1983569	0,73763	-0,003567

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

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

Дослід	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/23	Ефект
(1)	30,7	79,3	161,0	304,3	38,0	<i>T</i>
<i>a</i>	48,6	81,7	143,3	67,1	8,4	<i>A</i>
<i>b</i>	28,5	88,5	42,6	-31,2	-3,9	<i>B</i>
<i>ab</i>	53,2	54,8	24,6	-11,6	-1,4	<i>AB</i>
<i>c</i>	33,5	17,9	2,5	-17,7	-2,2	<i>C</i>
<i>ac</i>	55,0	24,7	-33,7	-18,0	-2,2	<i>AC</i>
<i>bc</i>	25,9	21,5	6,8	-36,1	-4,5	<i>BC</i>
<i>abc</i>	29,0	3,1	-18,4	-25,2	-3,1	<i>ABC</i>

Таблиця 4. Обчислення коефіцієнтів моделі форм-фактора f_r

Дослід	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	1,0000080	2,03184	4,06390	8,25602	1,03200
<i>a</i>	1,0318299	2,03207	4,19212	0,25963	0,03245
<i>b</i>	0,9994988	1,99190	0,06489	0,20855	0,02607
<i>ab</i>	1,0325677	2,20022	0,19474	0,19949	0,02494
<i>c</i>	0,9968246	0,03182	0,00023	0,12821	0,01603
<i>ac</i>	0,9950722	0,03307	0,20832	0,12985	0,01623
<i>bc</i>	1,0018647	−0,00175	0,00125	0,20810	0,02601
<i>abc</i>	1,1983569	0,19649	0,19824	0,19700	0,02462

Таблиця 5. Обчислення коефіцієнтів моделі кута нахилу λ

Дослід	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	0,77941	1,52081	3,02869	5,88665	0,73583
<i>a</i>	0,74140	1,50787	2,85796	0,03909	0,00489
<i>b</i>	0,70207	1,39704	0,06572	0,05095	0,00637
<i>ab</i>	0,80581	1,46093	−0,02663	0,19704	0,02463
<i>c</i>	0,71900	−0,03801	−0,01294	−0,17072	−0,02134
<i>ac</i>	0,67804	0,10374	0,06389	−0,09236	−0,01154
<i>bc</i>	0,72330	−0,04096	0,14175	0,07683	0,00960
<i>abc</i>	0,73763	0,01433	0,05529	−0,08646	−0,01081

Таблиця 6. Обчислення коефіцієнтів моделі коефіцієнта кривини k_p

Дослід	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	−0,00726	−0,01275	−0,02600	−0,04266	−0,00533
<i>a</i>	−0,00548	−0,01326	−0,01666	0,01037	0,00130
<i>b</i>	−0,00894	−0,00619	0,00641	−0,00479	−0,00060
<i>ab</i>	−0,00432	−0,01047	0,00397	0,00555	0,00069
<i>c</i>	−0,00341	0,00178	−0,00051	0,00935	0,00117
<i>ac</i>	−0,00278	0,00463	−0,00428	−0,00244	−0,00030
<i>bc</i>	−0,00690	0,00063	0,00285	−0,00377	−0,00047
<i>abc</i>	−0,00357	0,00333	0,00270	−0,00015	−0,00002

Стандартну похибку контраст-сум стовпчика (3) у табл. 3 для V_{Dws} було розраховано на основі стандартної похибки вимірювання як $1,21 \cdot \sqrt{8} = 3,42$ мкм, а стандартну похибку регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика – $1,21/\sqrt{8} = 0,43$ мкм. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів V_{Dws} є 0,9 мкм. Всі виявлені відмінності V_{Dws} перевищують подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів і за попередньою оцінкою є реальними (див. табл. 3). Аналогічно було розраховано стандартну похибку контраст-сум стовпчика (3) у табл. 4 для f_r , стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика і, як наслідок, подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів f_r склала $2,62 \cdot 10^{-3}$. Виявлені відмінності f_r перевищують

подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів і за попередньою оцінкою є реальними (див. табл. 4).

Обрахована на основі значення середньої стандартної похибки λ стандартна похибка контраст-сум стовпчика (3) табл. 5 буде дорівнювати $1,9 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{8} = 5,37 \cdot 10^{-4}$, а стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика – $1,9 \cdot 10^{-4} / \sqrt{8} = 6,72 \cdot 10^{-5}$. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів λ дорівнювала $1,34 \cdot 10^{-4}$. Всі виявлені відмінності λ перевищують подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів і за попередньою оцінкою є реальними (див. табл. 5).

Після аналогічних розрахунків подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів k_p є $1,3 \cdot 10^{-3}$ мкм⁻¹. У табл. 6 такою відмінністю k_p , яка перевищує подвійну стандартну похибку регресійних коефіцієнтів, є A , відмінності C і AB попадають у сумнівну область – вони перевищують їхню очікувану стандартну похибку, але менше її подвоєного значення, інші є меншими 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 в 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 A і B , а вплив взаємодії факторів BC перевищує значення головного ефекту B . Модель змінювання форм-фактора f_r має статистично значимий вплив взаємодії факторів AB і BC , який є більшим за вплив головних ефектів A , B і C . У моделі змінювання кута нахилу λ статистично значимим є вплив головного ефекту C , а вплив взаємодії факторів AB перевищує значення головного ефекту C . Модель змінювання коефіцієнта k_p має статистично значимий вплив головних ефектів A і C .

Оскільки коефіцієнти регресії більшості моделей змінювання показників шліфування відображають статистично значимий вплив як головних ефектів факторів так і двофакторної взаємодії, то перевіряли спільний вплив означених ефектів та їхньої взаємодії з використанням зворотного алгоритму Йетса [24]. 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.

Для моделі змінювання V_{Dws} знайдено середній відгук від ефекту взаємодії BC . У табл. 7, ліворуч, наведено вісім спостережених значень, згрупованих у двовимірну таблицю $B \times C$, праворуч ті ж дані показано усередненими попарно. Висновок про спільний вплив головних ефектів і взаємодії факторів для моделі змінювання V_{Dws} є таким: найбільш сприятливим для зменшення значення V_{Dws} є збільшення ефекту B за умови, коли ефект C знаходиться на нижньому рівні, менш сприятливим – коли ефект C знаходиться на верхньому рівні. Інші комбінації змінювання ефектів дають невиразні результати.

Нас цікавила та частина факторного простору, відгуки в точках якої показують найменші результати V_{Dws} . Тому за нижнього (–1) рівня ефекту C лінійне рівняння змінювання V_{Dws} матиме вигляд:

$$V_{Dws}|_{C=-} = 304,3 + 67,1x_1 - 31,2x_2 - 36,1x_2x_3|_{C=-} = 322 + 67,1x_1 + 4,9x_2.$$

Для моделі змінювання f_r перевіряли ситуацію, коли всі три ефекти окремо є незначимими, проте спільний вплив головних факторів і взаємодій може бути значимим. Знайдено середні відгуки для взаємодій AB і BC (табл. 8–9), отримані так само, як і у табл. 7.

Таблиця 7. Обчислення середніх відгуків взаємодій BC для непостійності діаметра кулі V_{Dws}

	–	B	B		
–	19,3 48,6	12,5 37,8	C	34,0 44,3	25,2 27,5 за середнього значення 32,8
C	33,5 55,0	25,9 29,0			

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

	–	A	A		
–	1,0000080 0,9968246	1,0318299 0,9950722	B	0,998416 1,000682	1,013451 1,115462 за середнього значення 1,032003
B	0,9994988 1,0018647	1,0325677 1,1983569			

Таблиця 9. Обчислення середніх відгуків взаємодій BC для форм-фактора f_r

	–	B	B		
–	1,0000080 1,0318299	0,9994988 1,0325677	C	1,015919 1,000682	1,016033 1,100111 за середнього значення 1,032003
C	0,9968246 0,9950722	1,0018647 1,1983569			

Висновок про спільний вплив головних ефектів і двофакторної взаємодії на f_r з огляду на те, що авторів цікавила та частина факторного простору, відгуки в точках якої мають значення $f_r = 1 \pm 0,007$, полягає в наступному. Лише спільний вплив ефектів двофакторних взаємодій AB і BC , причому за умови, коли ефект A знаходиться на нижньому рівні, або за умови, коли ефект C знаходиться на верхньому рівні, а ефект B – на нижньому, є сприятливим для наближення значення f_r до одиниці, а інші комбінації змінювання ефектів дають невиразні результати. Тоді у разі спільного впливу двофакторних взаємодій AB і BC за умови, коли ефекти A і B у відповідних двофакторних взаємодіях знаходяться на нижньому (–1) рівні лінійне рівняння змінювання f_r , яке відображає сумарний вплив взаємодій факторів AB і BC , має вигляд

$$f_r|_{A=B} = 8,25602 + 0,19949x_1|_A \cdot x_2 + 0,20810x_2|_B \cdot x_3 = 8,25602 - 0,19949x_2 - 0,20810x_3.$$

Фізичний сенс отриманого рівняння полягає в наступному. По-перше, воно відображає частину факторного простору, отриману за умови, що подача на врізання круга є на нижньому рівні; по-друге, маємо саме ту частину факторного простору, відгуки в точках якої показують значення f_r , наближені до одиниці; і по-третє, досягнення значень f_r , наближених до одиниці, слід очікувати за верхнього рівня швидкості подачі кульок й зменшення швидкості обертання круга.

Для моделі змінювання λ знайдено середні відгуки для взаємодій AB і BC (табл. 10–11). Висновок про спільний вплив головних факторів і взаємодії на λ полягає в наступному: лише спільний вплив ефектів C і AB , причому за умови, коли ефекти A і C знаходяться на верхньому, а ефект B – на нижньому рівні, є сприятливим для зниження значення λ , а інші комбінації змінювання ефектів дають невиразні результати.

Таблиця 10. Обчислення середніх відгуків взаємодій AB для кута нахилу λ

	–	A		A	
–	0,77941 9,71900	0,74140 0,67804	B	0,74921	0,70972
B	0,70207 0,72330	0,80581 0,73763		0,71269	0,77172

за середнього значення 0,73584

Таблиця 11. Обчислення середніх відгуків взаємодій BC для кута нахилу λ

	–	B		B	
–	0,77941 0,74140	0,70207 0,80581	C	0,76041	0,75394
C	0,71900 0,67804	0,72330 0,73763		0,69852	0,73047

за середнього значення 0,73584

Тут сумарний вплив ефекту C , “підсиленого” двофакторною взаємодією AB , в якій ефект B знаходиться на нижньому (–1) рівні, буде відображено лінійним рівнянням змінювання λ :

$$\lambda = 5,88665 + 0,19704x_1x_2|_{B-} - 0,17072x_3 = 5,88665 - 0,19704x_1 - 0,17072x_3.$$

Фізичний сенс отриманого рівняння полягає в наступному: для вирівнювання зносу круга, якого досягають мінімізацією значення λ , слід збільшувати як s_b , так і ω_3 за мінімального значення ω_k .

Отже, зважаючи на результати перевірки спільного впливу факторів, дотримувалися гіпотези, що всі обрані показники процесу можна описати лінійними 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 з табличним значенням $F_{(0,05,6,16)} = 2,74$ або $F_{(0,05,6,40)} = 2,34$. Результати обчислень представлено у табл. 12–15, позначення дослідів наведено лише у табл. 12 в останньому стовпчику (у табл. 13–15 ці позначення не наведено).

Таблиця 12. Обчислення значень Y за моделлю для непостійності діаметра кулі V_{Dws}

Ефект	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³	Дослід
<i>ABC</i>	0	0	0	376,3	47,0	<i>abc</i>
<i>BC</i>	0	0	376,3	242,0	30,3	<i>bc</i>
<i>AC</i>	0	4,9	0	366,5	45,8	<i>ac</i>
<i>C</i>	0	371,4	242,0	232,2	29,0	<i>c</i>
<i>AB</i>	0	0	0	376,3	47,0	<i>ab</i>
<i>B</i>	4,9	0	366,5	242,0	30,3	<i>b</i>
<i>A</i>	67,1	4,9	0	366,5	45,8	<i>a</i>
<i>T</i>	304,3	237,1	232,2	232,2	29,0	(1)

Таблиця 13. Обчислення значень Y за моделлю для форм-фактора f_r

Ефект	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	0,00037	7,65183	0,95648
<i>BC</i>	0	0,00037	7,65146	7,66361	0,95795
<i>AC</i>	0	-0,00477	0,00037	7,66137	0,95767
<i>C</i>	0,00037	7,65623	7,66324	7,67315	0,95914
<i>AB</i>	0	0	0,00037	7,65109	0,95639
<i>B</i>	-0,00477	0,00037	7,66100	7,66287	0,95786
<i>A</i>	-0,00589	-0,00477	0,00037	7,66063	0,95758
<i>T</i>	7,66212	7,66801	7,67278	7,67241	0,95905

Таблиця 14. Обчислення значень Y за моделлю для кута нахилу λ

Ефект	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	-0,17072	5,51889	0,689861
<i>BC</i>	0	-0,17072	5,68961	5,91297	0,739121
<i>AC</i>	0	0	-0,17072	5,51889	0,689861
<i>C</i>	-0,17072	5,68961	6,08369	5,91297	0,739121
<i>AB</i>	0	0	-0,17072	5,86033	0,732541
<i>B</i>	0	-0,17072	5,68961	6,25441	0,781801
<i>A</i>	-0,19704	0	-0,17072	5,86033	0,732541
<i>T</i>	5,88665	6,08369	6,08369	6,25441	0,781801

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

$$V_{DwL} = 38,0 + 8,4x_1 + 0,6x_2;$$

$$f_r = 1,032 - 0,02494x_2 - 0,02601x_3;$$

$$\lambda = 0,73583 - 0,02463x_1 - 0,02134x_3;$$

$$k_p = -0,00533 + 0,00130x_1 + 0,00117x_3,$$

або з натуральними значеннями факторів (тут значення s_b слід застосовувати у міліметрах)

$$V_{DwL} = 15,8 + 559,3056s_B + 0,0195\omega_K;$$

$$f_r = 1,25664 - 7,93 \cdot 10^{-4}\omega_K - 4,96 \cdot 10^{-3}\omega_3;$$

$$\lambda = 0,88903 - 1,642s_B - 0,00407\omega_3;$$

$$k_p = -0,013599 + 0,086442s_B + 0,000223\omega_3.$$

Таблиця 15. Обчислення значень Y за моделлю для коефіцієнта k_p

Ефект	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	0,00935	-0,02294	-0,00287
<i>BC</i>	0	0,00935	-0,03229	-0,04369	-0,00546
<i>AC</i>	0	0	0,00935	-0,02294	-0,00287
<i>C</i>	0,00935	-0,03229	-0,05303	-0,04369	-0,00546
<i>AB</i>	0	0	0,00935	-0,04164	-0,00520
<i>B</i>	0	0,00935	-0,03229	-0,06238	-0,00780
<i>A</i>	0,01037	0	0,00935	-0,04164	-0,00520
<i>T</i>	-0,04266	-0,05303	-0,05303	-0,06238	-0,00780

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

У досліджуваному процесі шліфування з базуванням куль на площину й круговою подачею з коливанням має місце зниження одного з показників точності форми куль – непостійності діаметра кулі V_{DwL} – до мінімальних значень 26–28,5 мкм, що у порівнянні зі схемою шліфування куль з круговою подачею [22], де мінімальні значення V_{DwL} сягали 29–30 мкм, свідчить про певний прогрес у підвищенні точності форми куль. Як показують розрахунки на основі лінійної моделі змінювання непостійності діаметра куль V_{DwL} у досліджуваному процесі шліфування, її значення в діапазоні 19–20 мкм слід очікувати за умови вибору частоти кругової подачі на рівні $\omega_3 = 18,3 \text{ c}^{-1}$ й зниження подачі круга на врізання до $s_B = 0,005\text{--}0,01 \text{ мм/5 хв}$ з одночасним зниженням частоти обертання круга до $\omega_K = 41,8\text{--}73,3 \text{ c}^{-1}$ (рис. 3, а).

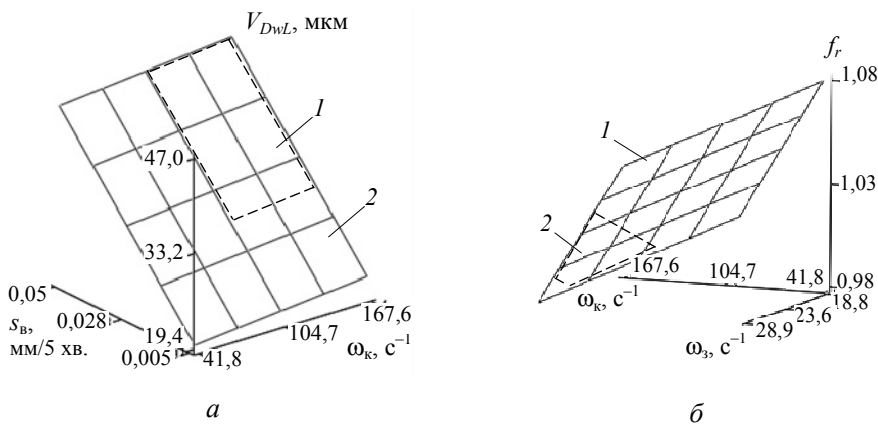


Рис. 3. Моделювання змінювання V_{DwL} (а) і f_r (б) залежно від факторів режиму обробки: поверхня відгуку в межах дослідженого діапазону (1), прогнозована (2).

Як і за шліфування куль з круговою подачею [22], у процесі шліфування з круговою подачею й коливанням маємо тенденцію до поступового переходу значень форм-фактора f_f від таких, що є більшими за одиницю, до таких, що є меншими за одиницю (див. рис. 3, б). На рис. 3, б показано ту частину факторного простору, відгуки в точках якої мають значення $f_f = 1 \pm 0,007$ (область 2). Як показують розрахунки на основі отриманої лінійної моделі, за умови вибору подачі круга на врізання на рівні $s_b = 0,02$ мм/5 хв їх слід очікувати в частині досліджуваного діапазону змінювання швидкостей обертання круга ($\omega_k \leq 167,6$ с⁻¹) й подачі кульок ($\omega_3 \leq 28,9$ с⁻¹) за наступних обмежень: $\omega_3 \geq -0,074\omega_k + 36,3$ с⁻¹ й $\omega_3 \leq -0,074\omega_k + 38,9$ с⁻¹.

Якщо зношування алмазного круга під час шліфування керамічних куль з круговою подачею й коливанням оцінювати розмахом змінювання координат профілю ($y_{\max} - y_{\min}$), то цей показник коливається протягом проведення дослідів в межах 115–150 мкм (рис. 2). Аналогічні розрахунки, проведені для процесу шліфування куль з круговою подачею [22], показують, що там розмах ($y_{\max} - y_{\min}$) коливається в межах 158–202 мкм.

Розрахунки, проведені на основі отриманих моделі змінювання λ й k_p , показують, що зменшення кута нахилу λ на 30 % слід очікувати за умови вибору частоти обертання круга на рівні $\omega_k = 104,7$ с⁻¹ й виходу параметрів s_b і ω_3 за межі дослідженого діапазону, а саме: підвищення подачі круга на врізання до $s_b = 0,05$ мм/5 хв з одночасним підвищенням частоти обертання стола з кулями до $\omega_3 = 60,3$ с⁻¹, а досягнення коефіцієнтом кривини k_p значень поблизу нуля слід очікувати за умови $s_b = 0,05$ мм/5 хв й виходу параметра ω_3 за межі дослідженого діапазону, а саме: підвищенням його значення до $\omega_3 \approx 41,6$ с⁻¹.

Отже, зменшенню V_{DwL} до 19–20 мкм й одночасно досягненню максимальних значень f_f за досліджуваної схеми шліфування сприяють зниження подачі круга на врізання до $s_b = 0,005$ мм/5 хв й частоти обертання круга до $\omega_k = 41,8$ с⁻¹. Одночасно певного вирівнювання зносу шліфувального круга по профілю слід очікувати за умови обрання ω_3 в діапазоні 41,6–60,3 с⁻¹.

ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження впливу схеми базування куль й режиму алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію за кругової подачі й коливання 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: непостійності діаметра кулі – від подачі круга на врізання й частоти його обертання; форм-фактора круглограм – від частот обертання круга й стола з кулями; кута нахилу профілю круга й коефіцієнта кривини його профілю – від подачі круга на врізання й частоти обертання стола з кулями.

Знайдено значення параметрів режиму обробки, за яких застосування шліфування з дослідженою схемою базування куль є доцільним, зокрема непостійність діаметра кулі зменшується до 19–20 мкм за подачі алмазного круга на врізання $s_b = 0,005$ мм/5 хв й частоти обертання круга $\omega_k = 41,8$ с⁻¹, а значення форм-фактора круглограм, наближені до одиниці, досягаються у встановленій області змінювання швидкостей обертання круга й подачі кульок.

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 based on the plane
with circular feed and oscillation

In article, for diamond grinding of ceramic balls made of silicon nitride based on the plane with a circular feed and oscillation, 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 is described by adequate linear functions: the variation of the ball diameter – from the depth feed of the wheel and its rotation frequency, the form factor of the out-of-roundness ball profile – in addition to the specified parameters from the frequency of rotation of the table with balls, the angle of inclination of the wheel profile and the curvature coefficient of its profile – from the depth feed of the wheel and frequency of rotation of the table with balls. Combinations of factors of the processing mode within the studied range of changes were determined, which are the basis for the subsequent optimization of the values of the indicated indicators.

Keywords: ceramic balls from silicon nitride, diamond grinding, machining conditions, variation of ball diameter, form factor of out-of-roundness ball profile, wear of the wheel.

1. Cundill R.T. High-precision Silicon Nitride Balls for Bearings. Washington: Bellingham Int. Soc. For Optical Engineering, 1992. Vol. 1573.
2. Wang L., Snidle R.W., Gu L. Rolling contact silicon nitride bearing technology: A review of recent research. *Wear*. 2000. Vol. 246, no. 1–2. P. 159–173.
3. 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.
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. Richerson D.W. Modern Ceramic Engineering, Properties, Processing and use in Design. Taylor e Francis Group, Boca Raton, USA, 2006.
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. 1227.
7. He Ch., Zhang J., Geng K., Wang S., Luo M., Zhang X., Ren C. 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. Dowson D., Hamrock B.J. History of Ball Bearings. 1981. <https://core.ac.uk/download/pdf/42861682.pdf>
12. 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.
13. Pedroso M.P.G., Fortulan C.A. Model based design applied to ceramic balls grinding. *CIRP*. 2019. Vol. 81. P. 306–309.
14. Kang J., Hadfield M. A novel eccentric lapping machine for finishing advanced ceramic balls. *J. Eng. Manuf.* 2001. Vol. 215. P. 781–795.
15. 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. Mechanical Mechatr. Eng.* 2015. Vol. 9, no. 5. P. 684–691.

16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Jiang M., Komanduri R. On the finishing of Si₃N₄ balls for bearing applications. *Wear.* 1998. Vol. 215, iss. 1–2. P. 267–278.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
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-х т. Т. 2. Киев; Изд-во КНТ, 2011. 453 с.

Надійшла до редакції 23.12.23

Після доопрацювання 13.09.24

Прийнята до опублікування 30.09.24