

Дослідження процесів обробки

УДК 621.9.025.77:615.46:616.728

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 у кільцевій канавці

Для алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію у кільцевій канавці і з круговою подачею представлено результати експериментального дослідження впливу режиму обробки на точність форми куль й зношування поверхні алмазного круга. Показниками точності форми шліфованих куль були непостійність діаметра кулі й форм-фактор круглограми, зношування поверхні круга – кут нахилу робочої поверхні у радіальному напрямку й коефіцієнт кривини. Означений вплив описано адекватно лінійними залежностями непостійності діаметра кулі від частоти кругової подачі й частоти обертання круга, форм-фактора від подачі круга, а кута нахилу й коефіцієнта кривини від частоти кругової подачі. Спрогнозовано значення параметрів режиму обробки, за яких застосування дослідженої схеми шліфування куль є доцільним.

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

ВСТУП

Перевагою застосування керамічних композиційних матеріалів на сучасному етапі розвитку техніки є підвищення експлуатаційних характеристик (теплостійкості, надійності й терміну служби), наприклад, авіаційних газотурбінних двигунів завдяки збереженню механічних властивостей, високій зносо- і корозійній стійкості їхніх керамічних компонентів за високих температур. Гібридні шарикопідшипники мають керамічні тіла кочення й кільця з жароміцних матеріалів, що дозволяє забезпечити більш тривалий термін служби й кращі робочі характеристики за високих швидкостей обертання [1]. Технологія виготовлення прецизійних куль з керамічних матеріалів не є новою, але постійне удосконалення самих керамічних матеріалів потребує й неодмінного удосконалення технології їхньої алмазної обробки [2].

Огляд світового досвіду технологій механічної обробки керамічних куль до високого ступеня точності і якості стисло подано в [3]. Основний принцип

абразивної обробки куль між двома дисками залишається незмінним, проте застосовують ряд різновидів методу, а саме: обробку між двома [4] та трьома дисками [3, 5–6] у канавці V-подібного профілю, між двома дисками у ексцентричній [7, 8] чи спіральній [9, 10] канавці V-подібного профілю. Для фінішної обробки поверхні керамічних куль застосовують доведення у магнітно-абразивному рідинному середовищі [11, 12], кластерне магнітно-реологічне доведення [13, 14]. Технологічні схеми згаданих різновидів методу обробки прецизійних куль між дисками наведено в [15].

Алмазне формотворне шліфування заготовок керамічних куль вирішує задачу надання останнім сферичної форми для наступного уточнення цієї форми алмазним доведенням. Цілком очевидно, що підвищення точності форми сферичної поверхні кулі під час шліфування сприяє зменшенню витрат часу на алмазне доведення. В Інституті надтвердих матеріалів НАН України ім. В. М. Бакуля розроблено й запатентовано технологію шліфування куль з високотвердої кераміки торцем алмазного круга [16]. Під час шліфування за такою схемою вільно обертові заготовки куль спираються однією точкою на горизонтальну площину обертового столу верстату й центруються на окружності їхньої кругової подачі завдяки також точковому контакту з оберненими до столу конусними поверхнями пристрою, внутрішню з яких виконано на центральному диску, обертовому разом зі столом, а зовнішню – на необертovому притискному кільці, що пружно притискає заготовки одночасно і до столу, і до диска. Обробка здійснюється саме тієї частини заготовки, яка виступає над кільцевим пазом, утвореним крайками центрального диска й притискного кільця. Обрана в [16] технологічна схема шліфування куль торцем алмазного круга є певною мірою удосконаленням схеми обробки між двома дисками у канавці V-подібного профілю [4]. У [17] вона використана для дослідження зношування круга залежно від схеми перекриття ним траєкторії подачі куль і режиму обробки. Однак за обробки заготовок розміром менше 12 мм кут загострення крайок центрального диска і 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 [15] застосовано схему шліфування торцем алмазного круга з 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 столу 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. Отже, розглянуті в [3–14] технології фінішної абразивної обробки куль слугують для досягнення необхідної точності форми з прийнятною продуктивністю. А попереднє шліфування заготовок куль, згадане в [15–17], слугує насамперед для формування сферичної поверхні з максимальною досяжною точністю.

Недоліком технологічної схеми шліфування з базуванням куль на площину, застосованої у [15], є стійка тенденція до збільшення зношування робочої поверхні круга у радіальному напрямку від осі його обертання, обумовлена поряд з іншими факторами й певним розташуванням отворів обертового сепаратора, і яку не вдається змінити будь-яким варіюванням режимів обробки у обраному діапазоні, що відповідно впливає на точність формування сферичної поверхні куль (28–67 мкм). Тому удосконаленням технологічної схеми,

застосованої в [15], є на наш погляд базування заготовок куль у кільцевій канавці V-подібного профілю (рис. 1), що сприяє певному вирівнюванню зношування поверхні шліфувального круга й дозволяє впливати на зношування круга варіюванням режимів обробки. Вплив зазначеної технологічної схеми шліфування й режиму обробки на закономірності зношування круга, як і точність форми керамічних куль в процесі шліфування, не досліджено.

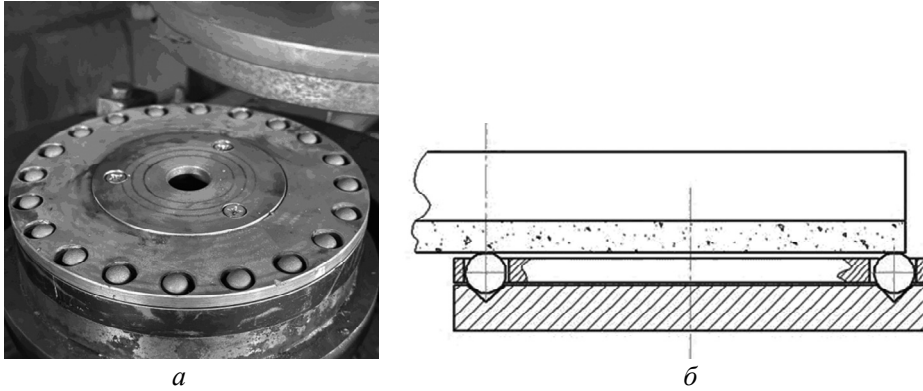


Рис. 1. Розташування отворів у сепараторі технологічного пристрою (а) і схема базування куль у кільцевій канавці V-подібного профілю (б).

Тому метою даного дослідження процесу алмазного шліфування керамічних куль з їхнім базуванням у кільцевій канавці V-подібного профілю було встановлення закономірності зношування круга й уточнення форми куль залежно від режиму обробки. Як і в [15], точність форми керамічних куль, які після алмазного шліфування мають відхилення від сферичної форми, оцінювали показником непостійності діаметра кулі, який вказує на максимальну різницю у поточних діаметрах кулі, і показником форм-фактора круглограм, отриманих вимірюванням некруглості шліфованої кулі на кругломірі у трьох взаємно перпендикулярних перерізах кулі. Форм-фактор дозволяє кількісно оцінити співвідношення довжини круглограми й площі, охопленої лінією профілю кулі.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Алмазне шліфування заготовок керамічних куль з нітриду кремнію проводили на фрезерному верстаті мод. 6Т12 зі встановленим на його робочому столі технологічним пристроєм для здійснення кругової подачі вільно обертових заготовок керамічних куль у кільцевій канавці V-подібного профілю і розміщених у отворах також вільно обертового сепаратора (див. рис. 1). Умовами дослідження обмежено режим обробки заготовок куль в діапазоні швидкостей шліфування 6,6–14,7 м/с і швидкостей подачі куль 1,3–2,1 м/с.

Алмазний шліфувальний круг форми 6А2Т 300×3 (з розташуванням суцільного алмазного шару на торці круга) містив алмази марки АС32 зернистістю 200/160 і концентрацією 100 на металевій зв'язці М2-01. Кількість одночасно оброблюваних заготовок керамічних куль складала 20 шт.

За обраної схеми шліфування досліджували вплив режиму обробки на зношування алмазного круга і точність форми керамічних куль. За допомогою повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^3 визначали коефіцієнти впливу режиму обробки, а саме: дискретної подачі круга на врізання s_b , частоти кругової подачі заготовок ω_3 й частоти обертання алмазного круга ω_k .

План повного факторного експерименту передбачав варіювання трьома факторами на наступних двох рівнях: дискретної подачі $s_b - 0,03$ і $0,06$ мм/10 хв (подачу здійснювали кожні 10 хв), частоти кругової подачі $\omega_3 - 18,3$ і $28,8$ с⁻¹ ($n_3 = 175$ і 275 об/хв), частоти обертання круга $\omega_k - 104,7$ і $167,6$ с⁻¹ ($n_k = 1000$ і 1600 об/хв). Час проведення кожного досліду – 60 хв.

Оскільки ПФЕ містить кінцеву кількість дослідів, він дозволяє отримати лише вибіркові оцінки коефіцієнтів лінійного рівняння. Згідно з рекомендаціями [18] план 2³ слід розглядати тоді, коли метою є виявлення відмінностей, що перевищують подвійну стандартну похибку.

Показниками зношування 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 тренду $y_r = f(r)$ залежно від радіусу поверхні круга, коефіцієнти яких за відповідних лінійного й квадратичного членів слугували показниками зношування круга. Показниками точності форми керамічних куль були непостійність діаметра кулі V_{Dws} (позначення згідно ISO 3290-2:2014) й форм-фактор f_r круглограми шліфованої кулі.

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 і збільшеною довжиною вимірювань, закріпленого на штативі, як описано в [15]. 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 під час виконання кожного досліду. Вимірювання повторювали для інших двох радіальних напрямків, рівновіддалених від першого напрямку і один від одного. Вимірювання виконували до проведення дослідів і після кожного досліду. Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [18] 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 вимірювання координати y_m обрахо-

ували 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 16,8 мкм.

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 [15]. Форм-фактор круглограми шліфованої 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 [15].

Оскільки кількість паралельних вимірів у дослідах була нерівною (круглограми знімали на рівні найбільшого діаметра кулі кожен раз на двох тих самих кулях, але з об'єктивних причин на певній кількості куль круглограми не отримано) обраховували середньозважене значення стандартної похибки для вимірів V_{Dws} і обрахованого значення f_r на кожній кулі окремо з наступним усередненням результатів. За нерівної кількості паралельних дослідів для перевірки однорідності рядкових дисперсій використано F -критерій Фішера. Згідно з рекомендацією [18] відношення максимальної рядкової дисперсії до мінімальної має бути менше табличного значення F -критерію за $f_{u\max} = m_{u\max} - 1$, $f_{u\min} = m_{u\min} - 1$ й обраному рівні ймовірності q – в такому випадку гіпотезу про однорідність дисперсій визнавали правомірною. Стандартна похибка вимірювання V_{Dws} склала 2,5 мкм, $f_r - 1,18 \cdot 10^{-4}$.

Для позначення розрахованих за моделлю величин використовували прописну літеру Y , а для відгуків у дослідах – рядкову літеру 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 .

Для обчислення коефіцієнтів лінійної моделі у факторних експериментах з обраними показниками скористалися алгоритмом Йетса [18], який для зручності реалізується у табличному вигляді, і полягає у операціях з 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 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.

Для перевірки адекватності математичних моделей скористалися F -критерієм Фішера, обчислюючи значення Y за зворотним алгоритмом Йетса [18], який найбільш просто здійснюється 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 у сфері експерименту.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті дослідження зношування алмазного круга 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 залежностей $y_r = f(r)$ як результату апроксимації вказаної сукупності точок функцією квадратичної регресії (рис. 2).

Апроксимована залежність для початкового профілю круга має вигляд $y_{r0} = 0,00003r^2 - 1,058r + 157,6$, інші залежності (після дослідів) представлено в табл. 1. Досліди виконували у випадковому порядку, але у табл. 1 вони представлені у звичайному. Для уникнення появи похибки розрахунків через розкид значень y_{mi} під час подальшого аналізу спиралися на апроксимовані залежності y_r .

Усереднені значення непостійності діаметра кулі V_{Dws} , розраховані значення кута нахилу λ , коефіцієнта k_p , форм-фактора f_r у дослідах представлено в табл. 2, де застосовано позначення опису експериментальних умов малими

літерами як найбільш компактне, оскільки за такої умови відсутність відповідної літери вказує на нижній рівень фактора, а її наявність – на верхній рівень.

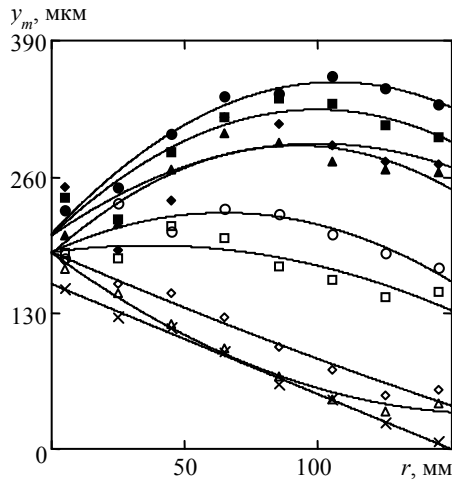


Рис. 2. Змінювання положення експериментальних й апроксимованих координат початкового (x) профілю й після проведення дослідів 1–8 у залежності від радіусу r поверхні круга: 3 (Δ), 4 (\diamond), 7 (\square), 8 (\circ), 5 (\blacktriangle), 6 (\blacklozenge), 1 (\blacksquare), 2 (\bullet).

Таблиця 1. Функції квадратичної регресії, якими апроксимовано змінювання координат профілю круга у радіальному напрямку

№ досліду	S_B , мм/10 хв	ω_B , c^{-1}	ω_K , c^{-1}	Лінійна лінія тренду y_r	Квадратична лінія тренду y_r
1	0,03	18,3	104,7	$y_{r1}=0,5952r+246,9$	$y_{r1}=-0,01211r^2+2,4122r+204,2$
2	0,06	18,3	104,7	$y_{r2}=0,8077r+250,5$	$y_{r2}=-0,01281r^2+2,7296r+205,4$
3	0,03	28,8	104,7	$y_{r3}=-1,0143r+167,6$	$y_{r3}=0,00557r^2-1,8491r+187,2$
4	0,06	28,8	104,7	$y_{r4}=-0,9780r+185,0$	$y_{r4}=0,00088r^2-1,1097r+188,1$
5	0,03	18,3	167,6	$y_{r5}=0,4089r+230,0$	$y_{r5}=-0,01234r^2+2,2594r+188,0$
6	0,06	18,3	167,6	$y_{r6}=0,4351r+235,0$	$y_{r6}=-0,00888r^2+1,7677r+203,7$
7	0,03	28,8	167,6	$y_{r7}=-0,3714r+204,9$	$y_{r7}=-0,00482r^2+0,3518r+187,9$
8	0,06	28,8	167,6	$y_{r8}=-0,1887r+219,8$	$y_{r8}=-0,00903r^2+1,1662r+187,9$

Таблиця 2. Показники зношування круга й точності форми куль

Позначення досліду	Показники зношування круга		Показники точності форми куль	
	λ , рад	k_p	V_{Dws} , МКМ	f_r
(1)	0,53688	-0,01211	93,5	0,98857
<i>a</i>	0,67942	-0,01281	81,3	0,98855
<i>b</i>	-0,79250	0,00557	78,5	0,99056
<i>ab</i>	-0,77428	0,00087	68,4	0,98844
<i>c</i>	0,38816	-0,01234	122,1	0,99096
<i>ac</i>	0,41039	-0,00888	131,9	0,98866
<i>bc</i>	-0,35561	-0,00482	95,5	0,98933
<i>abc</i>	-0,18651	-0,00903	117,1	0,98957

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).

Середня стандартна похибка λ була розрахована на основі стандартної похибки вимірювання y_m як $16,8 \text{ мкм}/140000 \text{ мкм} = 1,2 \cdot 10^{-4}$, де 140 мм є відстань між першою й останньою реперними точками. Тоді стандартна похибка контраст-сум стовпчика (3) табл. 3 буде дорівнювати $(1,2 \cdot 10^{-4}) \cdot \sqrt{8} = 3,39 \cdot 10^{-4}$, а стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика – $(1,2 \cdot 10^{-4})/\sqrt{8} = 4,24 \cdot 10^{-5}$. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів λ є $8,49 \cdot 10^{-5}$.

Таблиця 3. Обчислення коефіцієнтів моделі для кута нахилу λ

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³	Позначення ефекту
(1)	0,5367	1,2163	-0,3505	-0,0940	-0,0118	<i>T</i>
<i>a</i>	0,6794	-1,5668	0,2564	0,3521	0,0440	<i>A</i>
<i>b</i>	-0,7925	0,7986	0,1608	-4,1237	-0,5155	<i>B</i>
<i>ab</i>	-0,7743	-0,5421	0,1913	0,0226	0,0028	<i>AB</i>
<i>c</i>	0,3882	0,1425	-2,7831	0,6069	0,0759	<i>C</i>
<i>ac</i>	0,4104	0,0182	-1,3407	0,0306	0,0038	<i>AC</i>
<i>bc</i>	-0,3556	0,0222	-0,1243	1,4424	0,1803	<i>BC</i>
<i>abc</i>	-0,1865	0,1691	0,1469	0,2712	0,0339	<i>ABC</i>

Таблиця 4. Обчислення коефіцієнтів моделі для коефіцієнта k_p

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	-0,0121	-0,0249	-0,0185	-0,0536	-0,0067
<i>a</i>	-0,0128	0,0064	-0,0351	-0,0062	-0,0008
<i>b</i>	0,0056	-0,0212	-0,0054	0,0387	0,0048
<i>ab</i>	0,0009	-0,0139	-0,0008	-0,0117	-0,0015
<i>c</i>	-0,0123	-0,0007	0,0314	-0,0166	-0,0021
<i>ac</i>	-0,0089	-0,0047	0,0074	0,0047	0,0006
<i>bc</i>	-0,0048	0,0035	-0,0040	-0,0240	-0,0030
<i>abc</i>	-0,0090	-0,0042	-0,0077	-0,0037	-0,0005

Середня стандартна похибка k_p була розрахована також на основі стандартної похибки вимірювання y_m як середнє арифметичне різниці $(k_p - k_{p,c})$ для початкового профілю круга й у кожному досліді, де $k_{p,c} = k_{p,\max}$ якщо $k_p < 0$ й $k_{p,c} = k_{p,\min}$ 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 величину y_m у бік зменшення $k_{p,\max}$ або збільшення $k_{p,\min}$. Стандартна похибка k_p склала $2,52 \cdot 10^{-3}$. Звідси після аналогічних розрахунків подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів k_p є $1,78 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^{-1}$. Середня між двома середньозваженими стандартними по-

хибками $V_{Dws} \in 2,5$ мкм. Тоді стандартна похибка регресійних коефіцієнтів $V_{Dws} \in 2,5/\sqrt{8} = 0,9$ мкм, а подвійна стандартна похибка – 1,8 мкм. Середня між двома середньозваженими стандартними похибками f_r дорівнює $1,18 \cdot 10^{-4}$. Звідси після аналогічних розрахунків стандартна похибка регресійних коефіцієнтів f_r дорівнює $4,17 \cdot 10^{-5}$, а подвійна стандартна похибка – $8,34 \cdot 10^{-5}$.

Як бачимо з табл. 3, виявлені відмінності λ перевищують подвійну стандартну похибку Y і за попередньою оцінкою є реальними. У табл. 4 для k_p такими є B , C і BC , відмінність AB попадає у сумнівну область – вона перевищує її очікувану стандартну похибку, але менше її подвоєного значення. Що стосується відмінностей A , AC і ABC , то вони є меншими за стандартну похибку. У табл. 5 для V_{Dws} реальними є всі відмінності окрім ABC . І як видно з табл. 6, для f_r всі відмінності є реальними.

Таблиця 5. Обчислення коефіцієнтів моделі для непостійності діаметра кулі V_{Dws}

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	93,5	174,8	321,6	788,2	98,5
<i>a</i>	81,3	146,8	466,6	9,1	1,1
<i>b</i>	39,2	253,9	-22,3	-69,2	-8,7
<i>ab</i>	34,2	212,7	31,4	13,9	1,7
<i>c</i>	122,1	-12,2	-28,0	145,0	18,1
<i>ac</i>	131,9	-10,1	-41,3	53,7	6,7
<i>bc</i>	95,5	9,8	2,1	-13,3	-1,7
<i>abc</i>	117,1	21,6	11,8	9,7	1,2

Таблиця 6. Обчислення коефіцієнтів моделі для форм-фактора f_r

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	0,98857	1,97713	3,95613	7,91379	0,98922
<i>a</i>	0,98855	1,97900	3,95766	-0,00334	-0,00042
<i>b</i>	0,99056	1,97962	-0,00214	0,00029	0,00004
<i>ab</i>	0,98844	1,97804	-0,00120	0,00130	0,00016
<i>c</i>	0,99096	-0,00002	0,00187	0,00154	0,00019
<i>ac</i>	0,98866	-0,00212	-0,00158	0,00095	0,00012
<i>bc</i>	0,98847	-0,00230	-0,00210	-0,00345	-0,00043
<i>abc</i>	0,98957	0,00110	0,00340	0,00550	0,00069

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 ефектів взаємодії. Перевірка коефіцієнтів лінійної моделі за критерієм Стьюдента показала наступне. За довірчої ймовірності $p = 95\%$ ($t_{0,95;7} = 2,3646$) лінійні моделі змінювання кута нахилу λ і коефіцієнта k_p мають статистично значимий вплив головного ефекту B , лінійна модель непостійності діаметра кулі V_{Dws} – вплив головних ефектів B і C , а лінійна модель форм-фактора f_r –

вплив головного ефекту A , а також ефектів взаємодії BC і ABC , які є порівняними з головним.

Оскільки коефіцієнти регресії отриманої моделі змінювання f_r відображають статистично значимий вплив як головного ефекту так і двофакторної взаємодії, перевіряли спільний вплив означеного ефекту й взаємодії з використанням зворотного алгоритму Йетса. Іноді виявляється, що відгуки у точках, розташованих у деякій частині факторного простору, дуже великі (або дуже маленькі), тоді як значення відгуків в інших точках невиразні.

У разі використання зворотного алгоритму Йетса для f_r знайдено середні відгуки для взаємодій BC і AC (табл. 7 і 8). Ліворуч у табл. 7 наведено вісім спостережених значень, згрупованих у двовимірну таблицю $B \times C$. Праворуч ті ж дані показані усередненими попарно. Подібним способом отримана і табл. 8.

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

	–		B		
–	0,98857	0,99056	C	0,98856	за середнього значення 0,98922
	0,98855	0,98844		0,98950	
C	0,99096	0,98847	0,98981	0,98902	
	0,98866	0,98957			

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

	–		A		
–	0,98857	0,98855	C	0,98957	за середнього значення 0,98922
	0,99056	0,98844		0,98850	
C	0,99096	0,98866	0,98971	0,98912	
	0,98847	0,98957			

Висновок про спільний вплив головних факторів на f_r полягає в наступному: лише спільний вплив ефектів A , B і C , причому зазначеного першим на зростання за умови, коли інші знаходяться на нижньому рівні, є несприятливим для зростання значення форм-фактора f_r . Інші комбінації змінювання ефектів дають приблизно рівноцінні результати.

Отже, зважаючи на цей висновок, дотримуємося гіпотези, що всі обрані показники процесу можуть бути описані лінійним моделями, які слід перевірити на адекватність.

Обчислення значень Y за отриманими моделями здійснили за допомогою зворотного алгоритму Йетса. Результати обчислень представлено в табл. 9–12, позначення дослідів наведено лише в табл. 9 в останньому стовпчику (в табл. 10–12 ці позначення не наведено). Перевірку на адекватність здійснили за F -критерієм Фішера, порівнюючи його з табличним значенням $F_{(0,05,7,16)} = 2,665$, $F_{(0,05,6,40)} = 2,34$ або $F_{(0,05,7,40)} = 2,26$.

Отримані моделі з кодованими значеннями факторів мають наступний вигляд:

$$\lambda = -0,0118 - 0,5155x_2;$$

$$k_p = -0,0067 + 0,0048x_2;$$

$$V_{DwL} = 98,5 - 8,7x_2 + 18,1x_3;$$

$$f_r = 0,99048 - 0,00042x_1,$$

або з натуральними значеннями факторів (тут значення s_b слід застосовувати в мм)

$$\lambda = 2,30049 - 0,09818\omega_3;$$

$$k_p = -0,02841 + 0,00092\omega_3;$$

$$V_{DwL} = 58,9 - 1,648\omega_3 + 0,576\omega_k;$$

$$f_r = 0,99048 - 0,02785s_b.$$

Таблиця 9. Обчислення значень Y за моделлю для кута нахилу λ

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³	Позначення досліду
<i>ABC</i>	0	0	0	-4,2178	-0,5272	<i>abc</i>
<i>BC</i>	0	0	-4,2178	-4,2178	-0,5272	<i>bc</i>
<i>AC</i>	0	-4,1237	0	4,0297	0,5037	<i>ac</i>
<i>C</i>	0	-0,0940	-4,2178	4,0297	0,5037	<i>c</i>
<i>AB</i>	0	0	0	-4,2178	-0,5272	<i>ab</i>
<i>B</i>	-4,1237	0	4,0297	-4,2178	-0,5272	<i>b</i>
<i>A</i>	0	-4,1237	0	4,0297	0,5037	<i>a</i>
<i>T</i>	-0,0940	-0,0940	4,0297	4,0297	0,5037	(1)

Таблиця 10. Обчислення значень Y за моделлю для коефіцієнта k_p

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	0	-0,0148	-0,0019
<i>BC</i>	0	0	-0,0148	-0,0148	-0,0019
<i>AC</i>	0	0,0387	0	-0,0922	-0,0115
<i>C</i>	0	-0,0536	-0,0148	-0,0922	-0,0115
<i>AB</i>	0	0	0	-0,0148	-0,0019
<i>B</i>	0,0387	0	-0,0923	-0,0148	-0,0019
<i>A</i>	0	0,0387	0	-0,0923	-0,0115
<i>T</i>	-0,0536	-0,0536	-0,0923	-0,0923	-0,0115

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

На відміну від суцільно від'ємних значень кута нахилу λ за схеми шліфування куль на площині, отриманих в [15], за обраної схеми шліфування маємо тенденцію до поступового переходу значень λ від від'ємних до додатних. Результати розрахунків за отриманою моделлю λ свідчать, що значення λ поблизу нуля слід очікувати за умови обрання частоти подачі заготовок на рівні $\omega_3 \approx 23,4 \text{ c}^{-1}$ – в цьому випадку $\lambda \approx 10'$. Для порівняння за схеми шліфування куль на площині [15] значення λ на рівні 0,2 рад можливе за умови зменшення ω_3 до мінімуму в дослідженому діапазоні, тобто до $18,3 \text{ c}^{-1}$.

Таблиця 11. Обчислення значень Y за моделлю для непостійності діаметра кулі V_{Dws}

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	$(3)/2^3$
<i>ABC</i>	0	0	145,0	863,9	108,0
<i>BC</i>	0	145,0	719,0	863,9	108,0
<i>AC</i>	0	-69,2	145,0	1002,4	125,3
<i>C</i>	145,0	788,2	719,0	1002,4	125,3
<i>AB</i>	0	0	145,0	574,0	71,8
<i>B</i>	-69,2	145,0	857,4	574,0	71,8
<i>A</i>	0	-69,2	145,0	712,5	89,1
<i>T</i>	788,2	788,2	857,4	712,5	89,1

Таблиця 12. 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	7,91045	0,98881
<i>BC</i>	0	0	7,91045	7,91713	0,98964
<i>AC</i>	0	0	0	7,91045	0,98881
<i>C</i>	0	7,91045	7,91713	7,91713	0,98964
<i>AB</i>	0	0	0	7,91045	0,98881
<i>B</i>	0	0	7,91045	7,91713	0,98964
<i>A</i>	-0,00334	0	0	7,91045	0,98881
<i>T</i>	7,91379	7,91713	7,91713	7,91713	0,98964

Спираючись на отриману модель коефіцієнта кривини k_p можна стверджувати, що значення k_p поблизу нуля слід очікувати за умови виходу ω_3 за межі дослідженого діапазону, а саме: підвищенням його значення до $\omega_3 \approx 30,9 \text{ c}^{-1}$.

Якщо зношування алмазного круга оцінювати розмахом змінювання координат профілю ($y_{\max} - y_{\min}$), то цей показник коливається під час проведення дослідів в межах 62–152 мкм (див. рис. 2). Найбільш сприятливим для зниження розмаху ($y_{\max} - y_{\min}$) за результатами проведених дослідів є режим обробки: $s_B = 0,03 \text{ мм/10 хв}$, $\omega_3 = 28,8 \text{ c}^{-1}$ і $\omega_K = 167,6 \text{ c}^{-1}$. Аналогічні розрахунки, проведені за результатами [15], показують, що за схеми шліфування куль на площині розмах ($y_{\max} - y_{\min}$) коливається в межах 158–202 мкм [15], а найбільш сприятливим для його зниження є наступний режим обробки: $s_B = 0,03\text{--}0,06 \text{ мм/10 хв}$, $\omega_3 = 28,8 \text{ c}^{-1}$ і $\omega_K = 14,7 \text{ c}^{-1}$.

Отже, для схеми шліфування куль у кільцевій канавці вирівнювання зношування шліфувального круга вздовж профілю слід очікувати за умови обрання частоти подачі заготовок у діапазоні $\omega_3 = (23\text{--}31) \text{ c}^{-1}$ за будь-якого обмеження змінювання інших параметрів режиму обробки.

Як показують розрахунки на основі отриманої лінійної моделі непостійності діаметра куль V_{DwL} , її значення в діапазоні $V_{DwL} = 15\text{--}20 \text{ мкм}$ слід очікувати за умови виходу параметра ω_3 за межі дослідженого діапазону, а саме: його підвищенням до $\omega_3 \approx 39,3 \text{ c}^{-1}$ й обранням $\omega_K \approx 41,9 \text{ c}^{-1}$ (рис. 3). З іншого

боку за умови виходу параметра s_b за межі дослідженого діапазону, а саме: його зниження до 0,005 мм/10 хв, слід очікувати значення $f_r \approx 0,99034$, тобто найближче до одиниці – рівня найменших відхилень форми кулі від геометрично правильної.

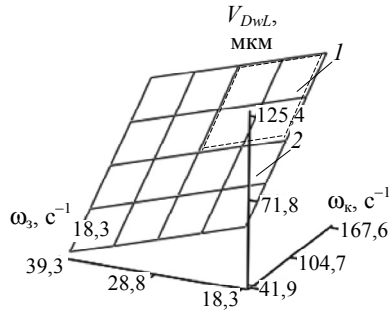


Рис. 3. Моделювання змінювання V_{DwL} залежно від факторів режиму обробки: поверхня відгук у межах дослідженого діапазону (1), прогнозована (2).

Отже, сприятливим для підвищення точності форми куль слід вважати режим обробки: $s_b \rightarrow \min$, $\omega_3 \approx 39,3 \text{ c}^{-1}$ й $\omega_k \approx 41,9 \text{ c}^{-1}$ із застереженням, що за такого режиму значення форм-фактора f_r буде не найкращим з тих, які можна досягти.

ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження процесу алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію з їхнім базуванням у кільцевій канавці V-подібного профілю було встановлено закономірності зношування круга й уточнено форму куль залежно від режиму обробки. Показано, що означений вплив режиму обробки адекватно описують лінійні залежності обраних показників процесу від параметрів режиму обробки: кута нахилу й коефіцієнта кривини поверхні круга – від частоти кругової подачі, непостійності діаметра кулі – від частоти подачі заготовок й частоти обертання круга, а форм-фактора – від подачі на врізання.

Спрогнозовано значення параметрів режиму обробки ($s_b \rightarrow \min$, $\omega_3 \approx 39,3 \text{ c}^{-1}$, $\omega_k \approx 41,9 \text{ c}^{-1}$), за яких застосування дослідженої схеми шліфування куль для досягнення $V_{DwL} = (15\text{--}20)$ мкм є доцільним.

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 with a circular feed

In article, for diamond grinding of ceramic balls made of silicon nitride with a circular feed, the results of an experimental study of the effect of the processing mode on the accuracy of the shape of the balls and the wear of the surface of the diamond wheel 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 profile, the wear of the wheel surface – the angle of inclination of the working surface in the radial direction and the curvature coefficient. The meaning effect is described adequately by linear dependences of the variation of the ball diameter on workpiece feed frequency and wheel rotation frequency, the form factor on cutting feed frequency, and the inclination angle and the curvature coefficient on workpiece feed frequency. The values of the parameters of the processing mode are predicted as conditions for the feasibility of applying the investigated ball grinding scheme.

Keywords: ceramic balls from silicon carbide, diamond grinding, processing mode, variation of ball diameter, form-factor of out-of-roundness profile of the ball, wear of the wheel.

1. Ножницкий Ю.А., Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л. Гибридные подшипники качения для авиационных двигателей (обзор): *Авиационные двигатели*. 2019. № 2 (3). С. 63–76.
2. 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. P. 1227.
3. Pedrosa 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.
4. 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.
5. Kurobe T., Kakuta H., Onoda M. Spin angle control lapping of balls (1st Report) – Theoretical analysis of lapping mechanism. *J. Japan Soc. Precis. Eng.* 1996. Vol. 6, no. 12. P. 1773–1777.
6. Pedrosa M.P.G., Fortulan C.A. Model based design applied to ceramic balls grinding. *CIRP*. 2019. Vol. 81. P. 306–309.
7. Kang J., Hadfield M. The polishing process of advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine. *Proc. Ins. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manufact.* 2005. Vol. 219, no. 7. P. 493–503.
8. 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. Mechan. Mechatr. Eng.* 2015. Vol. 9, no. 5. P. 684–691.
9. 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.
10. 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.
11. Childs T.H.C., Mahmood S., Yoon H.J. Magnetic fluid grinding of ceramic balls: *Tribology Int.* 1995. Vol. 28, iss. 6. P. 341–348.
12. Zhang B., Nakajima A. Dynamics of magnetic fluid support grinding of Si_3N_4 ceramic balls for ultraprecision bearings and its importance in spherical surface generation. *Precis. Eng.* 2003. Vol. 27. P. 1–8.
13. Xiao X.-L., Li G.-X., Mei H.-J., Yan Q.-S., Lin H.-T., Zhang F.-L. Polishing of silicon nitride ceramic balls by clustered magnetorheological finish. *Micromachines*. 2020. Vol. 11. art. 304.
14. Luo B., Yan Q., Pan J., Guo M. Uniformity of cluster magnetorheological finishing with dynamic magnetic fields formed by multi-magnetic rotating poles based on the cluster principle. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. Vol. 107. P. 919–934.
15. 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.
16. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Т. 6. Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки. Киев, 2007. 340 с.
17. 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.
18. Кононюк А.Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента): В 4 т. Т. 2. Киев: Изд-во КНТ, 2011. 453 с.

Надійшла до редакції 17.07.23

Після доопрацювання 11.10.23

Прийнята до опублікування 27.10.23