

**С. В. Сохань*, В. В. Возний, В. Г. Сороченко,
М. П. Гаманюк**

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

Алмазне шліфування керамічних куль з круговою подачею

Для алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію з круговою подачею представлено результати експериментального дослідження впливу режиму обробки на зношування поверхні алмазного круга й точність форми куль. Показниками зношування поверхні круга були кут нахилу робочої поверхні у радіальному напрямку й коефіцієнт кривизни, точності форми шліфованих куль – непостійність діаметра кулі й форм-фактор круглограми. Ефекти, які спостерігали, описано адекватними лінійними залежностями кута нахилу й коефіцієнта кривизни від частоти подачі заготовок, непостійності діаметра кулі від частоти обертання круга, а форм-фактору – від обох параметрів. Визначено комбінації факторів режиму обробки у межах дослідженого діапазону змінювання, які є підґрунтям для наступної оптимізації значень вказаних показників.

Ключові слова: керамічні кулі з нітриду кремнію, алмазне шліфування, кругова подача заготовок, дискретна подача круга на врізання, частоти подачі заготовок й обертання круга, зношування круга, непостійність діаметра кулі, форм-фактор круглограми кулі.

ВСТУП

На сучасному етапі проектування авіаційних газотурбінних двигунів існує потреба у підвищенні експлуатаційних характеристик (теплостійкості, надійності й терміну служби) основних конструктивних елементів двигуна через проектоване зростання температури робочого газу перед турбіною до 1850–2100°K. Перевагою керамічних композиційних матеріалів є збереження їхніх механічних властивостей за високих температур, високої зносо- і корозійної стійкості. У гібридних шарикопідшипниках використовують переваги керамічних тіл кочення з високою якістю поверхні кілець 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 і неодмінного удосконалення технології їхньої алмазної обробки [2].

Узагальнення світового досвіду удосконалення технологій механічної обробки керамічних куль до високого ступеня точності й якості стисло сформульовано в [3]: основний принцип абразивної обробки куль – наявність шліфувального чи доводочного круга й тягового диску – залишається незмінним, проте застосовують ряд різновидів методу, а саме: обробку між двома дисками у канавці V-подібного профілю [4] (рис. 1, а), між трьома дисками у кана-

вці V-подібного профілю [3,5–6] (див. рис. 1, б), між двома дисками в ексцентричній [7–8] (див. рис. 1, в) чи спіральній [9–10] (див. рис. 1, з) канавці V-подібного профілю. Для фінішної обробки поверхні керамічних куль застосовують доведення магнітно-абразивною рідиною [11–12] (див. рис. 1, д), кластерне магнітно-реологічне доведення [13–14] (див. рис. 1, е). Всі розглянуті методи слугують для досягнення необхідної точності форми з прийнятною продуктивністю, але в умовах, коли сферична поверхня кулі вже сформована з певною мірою точності.

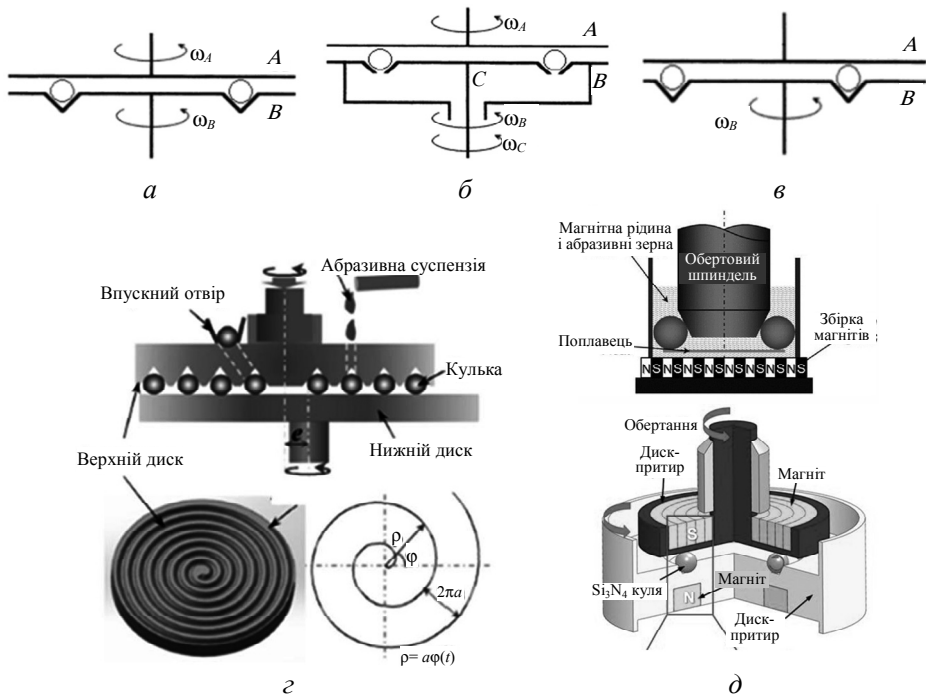


Рис. 1. Методи абразивної обробки керамічних куль до високого ступеня точності й якості [3]: між двома дисками у канавці V-подібного профілю (а), між трьома дисками у канавці V-подібного профілю (б), між двома дисками в ексцентричній (в) або спіральній (з) канавці V-подібного профілю [9–10], доведення поверхні магнітно-абразивною рідиною (д), кластерне магнітно-реологічне доведення [13–14] (е).

Задачею алмазного формотворного шліфування заготовок керамічних куль є надання останнім сферичної форми для наступного алмазного доведення їхньої поверхні. Окрім формотворення сферичної поверхні кулі процес шліфування куль має забезпечити певну точність форми куль. В ІНМ НАН України розроблено й запатентовано технологію шліфування куль з високотвердої кераміки торцем алмазного круга [15]. У процесі такого шліфування вільно обертові заготовки куль спираються однією точкою на горизонтальну площину обертового столу верстата й центруються на окружності їхньої кругової подачі завдяки також точковому контакту з оберненими до столу конусними лезами, внутрішнє з яких виконано на центральному диску, обертовому разом зі столом, а зовнішнє – на необертовому кільці, яке притискає заготовки одночасно і до столу, і до диску. Обробка здійснюється саме тієї частини заготовок, яка виступає над кільцевим пазом, утвореним лезами центрального диску й притискного кільця. Така технологічна схема шліфування куль торцем алмазного круга є до певної міри удосконаленням схеми

на рис. 1, а. У [16] вона використана для дослідження зношування круга залежно від схеми перекриття ним траєкторії подачі кулі і режиму обробки.

Однак за обробки заготовок розміром < 12 мм кут загострення лезових частин зменшується до критичного значення і втрачається основна функція лез утримувати вільно обертові кулі під час їхньої обробки. Для шліфування заготовок керамічних кулі розміром < 12 мм може бути застосована схема шліфування торцем алмазного круга з подачею кулі без виходу за край круга. Під час шліфування вільно обертові заготовки кулі, 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 від взаємодії як з обертовим столом, так і з вільно обертовими заготовками кулі, які штовхають сепаратор у напрямку свого руху. Схема безперервного шліфування торцем круга й режим обробки впливають як на характер зношування круга, так і на показники точності керамічних кулі, а закономірності такого впливу не досліджено. Тому метою даного дослідження було встановити закономірності зношування круга й змінювання показників точності форми керамічних кулі залежно від режиму безперервного алмазного шліфування торцем круга з круговою подачею кулі.

Оскільки керамічні кулі після алмазного шліфування мають розвинуті відхилення від сферичної форми, оцінювати точність форми кулі лише стандартним показником непостійності діаметра кулі, який вказує на максимальну різницю у поточних діаметрах кулі й ніяк не характеризує розвиненість відхилень від сферичної форми, явно замало. Водночас існують методики оцінки, наприклад, морфологічних властивостей алмазних зерен, засновані на 2D-аналізі їхніх проєкцій на площину, й одною з характеристик тут є форма проєкції зерна. Форма проєкції характеризується показником компактності – форм-фактором істинного зображення [17], який є оцінкою співвідношення периметра до площі так званого “істинного” зображення на відміну від розрахункового випуклого зображення, випуклий контур якого утворено дотичними лініями до найбільш випуклих ділянок й власне цими ділянками контуру зерна. Стосовно профілю шліфованої кулі показник форм-фактору пропонується застосувати до круглограм, отриманих вимірюванням некруглості на кругломірі у трьох взаємно перпендикулярних перерізах кулі. В такому сенсі він обраховується за формулою $f_r = p_r^2 / 4\pi A_r$, де p_r – довжина круглограми, A_r – площа фігури в межах контуру круглограми. Отже, форм-фактор круглограми дозволяє оцінити для шліфованої кулі розвиненість відхилень від сферичної форми.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Алмазне шліфування заготовок керамічних кулі з нітриду кремнію проводили на фрезерному верстаті мод. 6Т12 з встановленим на його робочому столі технологічним пристроєм для здійснення кругової подачі вільно обертових заготовок керамічних кулі в отворах також вільно обертового сепаратора (рис. 2). Умовами дослідження обмежено режим обробки заготовок кулі в діапазоні швидкостей шліфування 6,6–14,7 м/с і швидкостей подачі кулі 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 з основою з металевої зв'язки М2-01. Кількість одночасно оброблюваних заготовок керамічних кулі складала 20 шт.

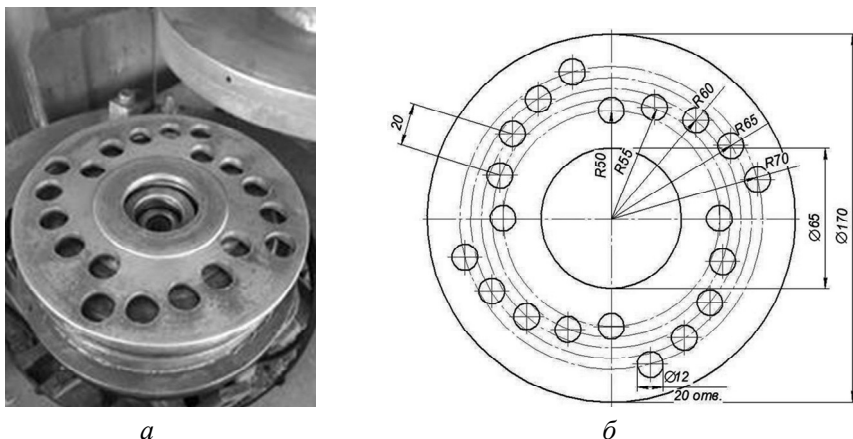


Рис. 2. Сепаратор технологічного пристрою (а) і схема розташування отворів у сепараторі (б).

За обраної схеми шліфування досліджували вплив режиму обробки на зношування алмазного круга і точність форми керамічних куль. Показниками зношування алмазного круга були кут нахилу λ робочої поверхні у радіальному напрямку і постійний коефіцієнт k_p складової другого порядку рівняння апроксимації профілю у вказаному напрямку – іншими словами коефіцієнт кривизни, для обрахунку яких вимірювали усереднену координату u_m профілю поверхні. Показниками точності форми керамічних куль були непостійність діаметра кулі V_{Dws} (позначення згідно ISO 3290-2:2014) й форм-фактор круглограми шліфованої кулі f_r .

Показник u_m обраховували після безпосереднього вимірювання поточної координати y_i робочої поверхні круга у трьох радіальних напрямках й наступного усереднення. Вимірювання поточної 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 [16]. Координату y_i вимірювали у восьми рівновіддалених одна від одної реперних точках, з яких перша й остання точки знаходилися за 5 мм від осі обертання й зовнішнього краю алмазного шару. Перший радіальний напрямок вибирали довільно і вже не змінювали його по ходу виконання кожного дослідження. Вимірювання повторювали для інших двох радіальних напрямків, рівновіддалених від першого напрямку і один від одного. На основі вимірювань обраховували усереднену координату u_m для кожної з реперних точок. Вимірювання виконували до і після кожного дослідження. Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [18], під час обрахунку середніх значень координати u_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 u_m обра-

ховували як середнє арифметичне похибок вимірювання u_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 12,7 мкм.

Непостійність діаметра кулі V_{Dws} (як різницю найбільшого й найменшого одиничного діаметра кулі згідно стандарту) визначали за круглограмами, приклад яких показано на рис. 3, отриманими у трьох взаємно перпендикулярних перерізах кулі на кругломірі мод. МК 300 (див. рис. 3, *a*), оснащеному електронними блоком для виводу цифрових даних на персональний комп'ютер.

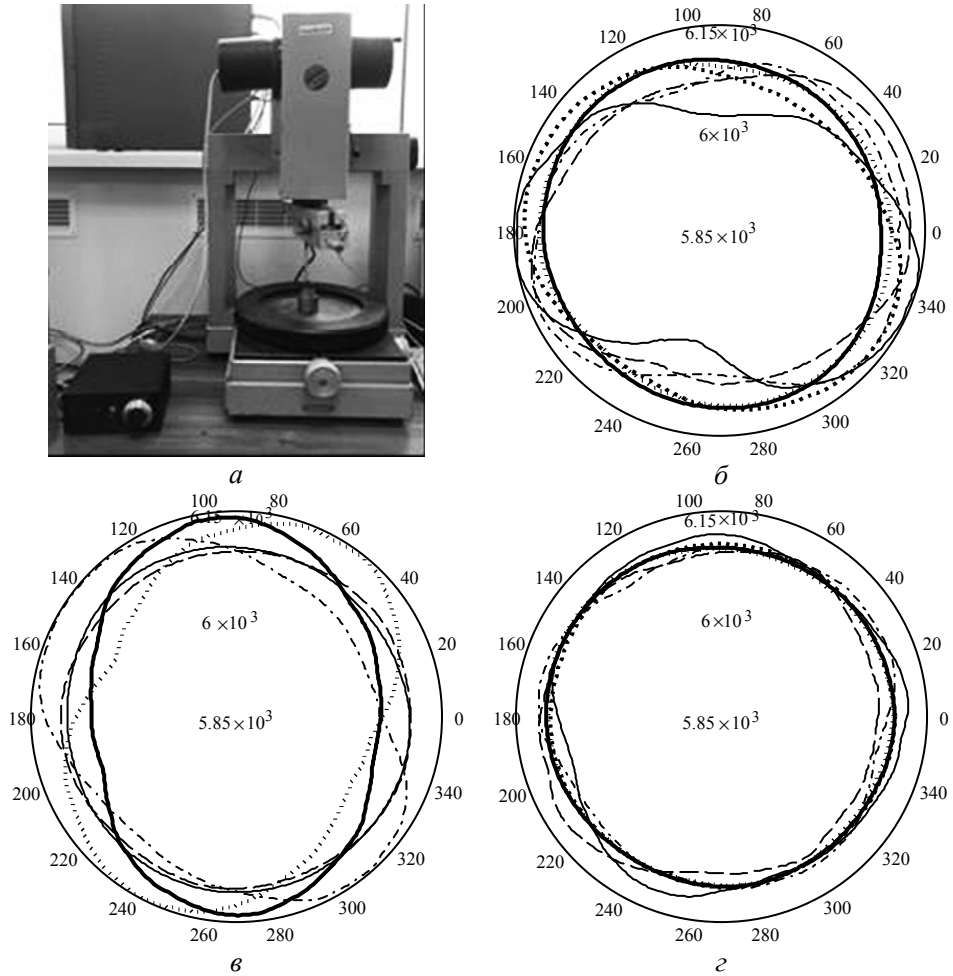


Рис. 3. Кругломір МК 300 (*a*) й круглограми шліфованої кулі: $f_{rm} = 1,00034$ (*b*), $1,00012$ (*б*), $0,99919$ (*з*).

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 за незмінного обраного значення радіуса кулі. Оскільки кількість паралельних вимірів у досліді була нерівною – круглограми знімали кожного разу на двох тих самих кулях, розташованих у сепараторі на окружностях найбільшого й найменшого діаметрів, але кількість круглограм з об'єктивних причин коливалася від 1 до 3 на кожній кулі – 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 використали F -критерій Фішера. Згідно

з рекомендацією [18] відношення максимальної рядкової дисперсії до мінімальної має бути менше табличного значення F -критерій, вибраного за $f_{u \max} = m_{u \max} - 1$, $f_{u \min} = m_{u \min} - 1$ та заданому рівні q . В такому випадку гіпотезу про однорідність дисперсій визнавали правомірною. Стандартна похибка вимірювання $V_{D_{\text{DWS}}}$ склала 1,7 мкм, $f_r = 3,38 \cdot 10^{-5}$.

За обрахованими значеннями u_m будували квадратичні – як найбільш адекватні даним дослідів – апроксимаційні моделі змінювання координати профілю $y_r = f(r)$ залежно від радіусу поверхні круга, коефіцієнти яких при лінійних й квадратичних членах слугували показниками зношування круга. Перший з них є тангенсом кута нахилу λ робочої поверхні круга у радіальному напрямку, а другий – коефіцієнтом кривизни k_p .

За допомогою повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^3 [18] визначали коефіцієнти впливу режиму обробки: поєднання дискретної подачі круга на врізання s_b , частоти кругової подачі заготовок ω_3 і частоти обертання алмазного круга ω_k . План експерименту передбачав варіювання факторами на наступних двох рівнях: дискретної подачі $s_b - 3 \cdot 10^{-5}$ і $6 \cdot 10^{-5}$ м (подачу здійснювали кожні 10 хв – 0,03 й 0,06 мм/10 хв), частоти кругової подачі $\omega_3 - 18,3$ і 28,8 рад/сек ($n_3 = 175$ й 275 об./хв), частоти обертання круга $\omega_k - 104,7$ і 167,6 рад/сек ($n_k = 1000$ й 1600 об./хв). Час проведення кожного дослідів – 1 год.

Оскільки ПФЕ містить кінцеву кількість дослідів, він дозволяє отримати лише вибіркові оцінки коефіцієнтів лінійного рівняння. Згідно з рекомендаціями [18] план 2^3 слід розглядати тоді, коли на меті є виявлення відмінностей, що перевищують подвійну стандартну похибку. Для позначення розрахованих за моделлю величин використовували прописну літеру Y , а для відгуків у досліді – 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. Суму восьми відгуків позначали прописною літерою T .

Для обчислення коефіцієнтів лінійної моделі у факторних експериментах з обраними показниками скористалися алгоритмом Йетса [18], для зручності його використовували в табличному вигляді й застосовували в операціях над результатами ПФЕ, записаними у стовпчику (0). Перша операція алгоритму полягає спочатку у попарному додаванні результатів дослідів зі стовпчика (0), а потім – у попарному відніманні, причому верхнє число віднімається від нижнього, з наступним записом результатів у стовпчик (1). Друга операція полягає у попарному додаванні й відніманні результатів, записаних у стовпчик (1), з наступним записом результатів у стовпчик (2) і т. д. Значення коефіцієнтів отримують діленням результатів стовпчика (3) на кількість дослідів.

Для перевірки адекватності математичних моделей скористалися F -критерієм Фішера, обчислюючи значення Y за зворотним алгоритмом Йетса [18], який найбільш просто здійснюється шляхом запису ефектів у зворотному порядку, виконання того ж набору додавань і віднімань та зчитуванням передбачених значень у порядку, зворотному звичайному. Таким способом 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 координат профілю робочої поверхні круга залежно

від режиму шліфування керамічних куль (рис. 4). Вказані закономірності отримано 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 за допомогою [13].

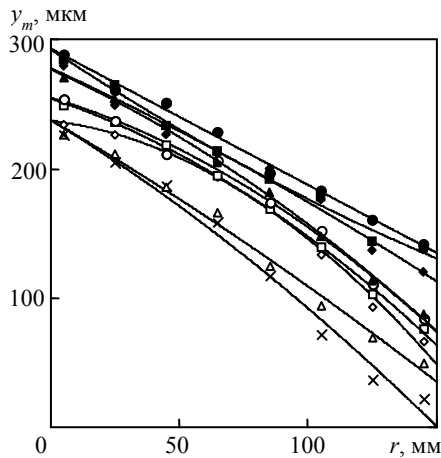


Рис. 4. Змінювання положення експериментальних й апроксимованих координат початкового (×) профілю й після проведення дослідів 1–8 у залежності від радіуса r поверхні круга: 1 (△), 2 (◇), 5 (□), 6 (○), 7 (◆), 8 (▲), 3 (■), 4 (●).

Апроксимована залежність для початкового профілю круга має вигляд $y_{r0} = -0,00249x^2 - 1,206x + 289,3$, а інші залежності (після проведення дослідів) представлено в табл. 1. Досліди виконували у випадковому порядку, але у табл. 1 їх представлено у звичайному. Щоб уникнути появи похибки розрахунків через розкид значень y_{mi} для подальшого аналізу спиралися на апроксимовані залежності y_r .

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

№ дослідів	Апроксимовані залежності y_r
1	$y_{r1} = -0,00126r^2 - 1,160r + 237,4$
2	$y_{r2} = -0,00682r^2 - 0,234r + 236,9$
3	$y_{r3} = +0,00161r^2 - 1,321r + 293,1$
4	$y_{r4} = +1,49 \cdot 10^{-5}r^2 - 1,059r + 293,6$
5	$y_{r5} = -0,00405r^2 - 0,665r + 254,2$
6	$y_{r6} = -0,00409r^2 - 0,594r + 254,8$
7	$y_{r7} = -0,00301r^2 - 0,899r + 277,7$
8	$y_{r8} = -0,00126r^2 - 0,910r + 278,4$

Усереднені значення непостійності діаметра кулі V_{Dws} , розраховані значення кута нахилу λ , коефіцієнта k_p , форм-фактора f_r у досліді представлено в табл. 2, де застосовано позначення опису експериментальних умов малими буквами як найбільш компактно, оскільки відсутність відповідної літери вказує на нижній рівень фактора, а її наявність – на верхній рівень.

Таблиця 2. Показники зношування круга й точності форми куль

Позначення досліджу	Показники зношування круга		Показники точності форми куль	
	λ , рад	k_p	V_{DWS} , мкм	f_r
(1)	-0,8592	-0,001265	55,7	1,000266
<i>a</i>	-0,2295	-0,006816	56,5	1,000240
<i>b</i>	-0,9228	0,001607	63,5	1,000119
<i>ab</i>	-0,8139	0,000015	67,2	1,000339
<i>c</i>	-0,5872	-0,004048	34,6	1,000222
<i>ac</i>	-0,5359	-0,004092	38,1	1,000171
<i>bc</i>	-0,7323	-0,003006	32,1	1,000225
<i>abc</i>	-0,7381	-0,001265	27,7	0,999189

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).

Таблиця 3. Обчислення коефіцієнтів моделі для кута нахилу λ

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³	Позначення ефекту
(1)	-0,85920	-1,08871	-2,82542	-5,41898	-0,67737	<i>T</i>
<i>a</i>	-0,22951	-1,73671	-2,59355	0,78396	0,09799	<i>A</i>
<i>b</i>	-0,92277	-1,12310	0,73851	-0,99535	-0,12442	<i>B</i>
<i>ab</i>	-0,81394	-1,47046	0,04544	-0,57793	-0,07224	<i>AB</i>
<i>c</i>	-0,58718	0,62968	-0,64800	0,23187	0,02898	<i>C</i>
<i>ac</i>	-0,53592	0,10883	-0,34736	-0,69307	-0,08663	<i>AC</i>
<i>bc</i>	-0,73232	0,05126	-0,52086	0,30064	0,03758	<i>BC</i>
<i>abc</i>	-0,73813	-0,00581	-0,05707	0,46379	0,05797	<i>ABC</i>

Середня стандартна похибка λ була розрахована на основі стандартної похибки вимірювання y_m як $12,7 \text{ мкм}/140000 \text{ мкм} = 9,07 \cdot 10^{-5}$. Тоді стандартна похибка контраст-сум третього стовпчика табл. 3 буде дорівнювати $9,07 \cdot 10^{-5} \sqrt{8} = 2,57 \cdot 10^{-4}$, а стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика – $9,07 \cdot 10^{-5}/\sqrt{8} = 3,21 \cdot 10^{-5}$. Подвійна стандартна похибка дорівнює $6,41 \cdot 10^{-5}$.

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 $k_p < 0$ або $k_{p,c} = k_{p,\min}$ 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 $2,15 \cdot 10^{-4}$. Звідси після аналогічних розрахунків подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів $k_p = 1,52 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}^{-1}$.

Таблиця 4. Обчислення коефіцієнтів моделі для коефіцієнта k_p

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	-0,001265	-0,008080	-0,006458	-0,018869	-0,002359
<i>a</i>	-0,006816	0,001622	-0,012411	-0,005446	-0,000681
<i>b</i>	0,001607	-0,008140	-0,007143	0,013571	0,001696
<i>ab</i>	0,000015	-0,004271	0,001696	0,005744	0,000718
<i>c</i>	-0,004048	-0,005551	0,009702	-0,005952	-0,000744
<i>ac</i>	-0,004092	-0,001592	0,003869	0,008839	0,001105
<i>bc</i>	-0,003006	-0,000045	0,003958	-0,005833	-0,000729
<i>abc</i>	-0,001265	0,001741	0,001786	-0,002173	-0,000272

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

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	55,7	112,2	235,0	366,0	45,8
<i>a</i>	56,5	122,9	131,0	16,8	2,1
<i>b</i>	63,5	72,7	12,3	-3,6	-0,4
<i>ab</i>	67,2	58,4	4,4	8,2	1,0
<i>c</i>	34,6	0,8	10,7	-104,0	-13,0
<i>ac</i>	38,1	11,5	-14,3	-7,9	-1,0
<i>bc</i>	28,7	3,5	10,6	-25,0	-3,1
<i>abc</i>	29,7	1,0	-2,5	-13,1	-1,6

Таблиця 6. Обчислення коефіцієнтів моделі для форм-фактору f_r

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	1,000266	2,000506	4,000964	8,000771	1,000096
<i>a</i>	1,000240	2,000458	3,999807	-0,000893	-0,000112
<i>b</i>	1,000119	2,000393	0,000194	-0,001027	-0,000128
<i>ab</i>	1,000339	1,999414	-0,001087	-0,000739	-0,000092
<i>c</i>	1,000222	-0,000026	-0,000048	-0,001157	-0,000145
<i>ac</i>	1,000171	0,000220	-0,000979	-0,001282	-0,000160
<i>bc</i>	1,000225	-0,000051	0,000246	-0,000931	-0,000116
<i>abc</i>	0,999189	-0,001036	-0,000985	-0,001231	-0,000154

Середня між двох середньозважених стандартних похибок V_{Dws} є 1,7 мкм. Тоді стандартна похибка регресійних коефіцієнтів V_{Dws} є $1,7/\sqrt{8} = 0,6$ мкм, подвійна стандартна похибка – 1,2 мкм.

Середня між двома середньозваженими стандартними похибками f_r є $3,38 \cdot 10^{-5}$. Звідси після аналогічних розрахунків подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів f_r є $2,39 \cdot 10^{-5}$. Як бачимо з табл. 3–4 і 6 виявлені від-

мінності λ , k_p і f_r перевищують подвійну стандартну похибку Y і за попередньою оцінкою є реальними. У табл. 5 для V_{Dws} такими є A , C , BC і ABC , а відмінності AB і AC попадають у сумнівну область – вони перевищують їхні очікувані стандартні похибки, але менше їхніх подвоєних значень. Відмінність B не попадає навіть у сумнівну область.

Перевірка коефіцієнтів лінійної моделі за критерієм Стьюдента показала наступне. За довірчої ймовірності $p = 95\%$ ($t_{c, 95; 7} = 2,3646$) лінійні моделі змінювання кута нахилу λ мають статистично значимі коефіцієнти при головних ефектах A і B , коефіцієнт k_p – при головному ефекті B , а лінійна модель непостійності діаметра кулі V_{Dws} ($t_{c, 99; 8; 24} = 3,4668$) – при головному ефекті C .

Разом з тим 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. У такому розумінні математична модель кута нахилу λ має коефіцієнти при головному ефекті A й ефекті взаємодії першого порядку AC , які є меншими не більше аніж на третину за головний ефект B , а математична модель коефіцієнта k_p – коефіцієнт з таким же значенням при ефекті взаємодії першого порядку AC . Математична модель форм-фактора f_r за довірчої ймовірності $p = 90\%$ ($t_{c, 90; 7} = 1,8946$) має статистично значимий коефіцієнт при ефекті взаємодії AC , який перевищує головні ефекти A , B і C . Тому моделі мають бути перевірені на спільний вплив головних ефектів і взаємодії з використанням зворотного алгоритму Йетса. У [18] запропоновано наступний спосіб інтерпретації ситуацій, які виникли.

За використання зворотного алгоритму Йетса знайдено середні відгуки для взаємодій. Для кута нахилу λ вказані відгуки знайдено для взаємодій AB і AC (табл. 7–8). Ліворуч у табл. 7 наведено вісім спостережених значень, згрупованих у двовимірну таблицю $A \times B$. Праворуч ті ж дані показані усередненими попарно. Подібним способом отримано табл. 8–10 з двовимірною таблицею $A \times C$. За даними табл. 7 (праворуч) можна пересвідчитися, що вплив зменшення значення B за умови зростання значення A набагато дієвіший, аніж за умови зменшення значення A . Аналогічним чином вплив зростання значення A за умови зменшення значення C набагато дієвіший, аніж за умови зростання значення C (див. табл. 8, праворуч). Тоді ситуацію можна описати так: “Для мінімізації кута нахилу λ сприятливим є зменшення значення B за умови зростання значення A й зменшення значення C , а інші комбінації змінювання ефектів дають приблизно рівноцінні результати”.

Для коефіцієнта k_p ситуацію можна описати так: “Для зменшення викривлення профілю круга у процесі зношування сприятливим є зростання значення B за умови зменшення значень A і C , а інші комбінації змінювання ефектів дають приблизно рівноцінні результати”. зростання значень B і C за умови зростання значення A за умови максимального значення C набагато дієвіший, аніж за умови його мінімального значення. Водночас вплив C за умови максимального значення A набагато дієвіший, аніж за умови його мінімального значення. Для форм-фактору f_r ситуацію можна описати так: “Умова зростання до певної межі всіх ефектів є сприятливою для зменшення значення форм-фактору f_r до одиниці, а інші комбінації змінювання ефектів дають приблизно рівноцінні результати або дещо збільшують f_r ”.

Отже, зважаючи на те, що відгуки λ , k_p і f_r у точках деякої частини факторного простору аномально відрізняються, дотримуємося гіпотези, що всі обра-

ні показники процесу можуть бути описані лінійними моделями, які слід перевірити на адекватність.

Таблиця 7. Обчислення середніх відгуків взаємодій АВ для кута нахилу λ

	–	A	A		
–	–0,85920	–0,22951	B	–0,72319	за середнього значення –0,67737
	–0,58718	–0,53592		–0,38272	
B	–0,92277	–0,81394	–0,82754	–0,77604	
	–0,73232	–0,73813			

Таблиця 8. Обчислення середніх відгуків взаємодій AC для кута нахилу λ

	–	A	A		
–	–0,85920	–0,22951	C	–0,89098	за середнього значення –0,67737
	–0,92277	–0,81394		–0,52173	
C	–0,58718	–0,53592	–0,65975	–0,63703	
	–0,73232	–0,73813			

Таблиця 9. Обчислення середніх відгуків взаємодій AC для коефіцієнту k_p

	–	A	A		
–	–0,001265	–0,006816	C	0,000171	за середнього значення –0,002359
	0,001607	0,000015		–0,003400	
C	–0,004048	–0,004092	–0,003527	–0,002679	
	–0,003006	–0,001265			

Таблиця 10. Обчислення середніх відгуків взаємодій AC для форм-фактору f_r

	–	A	A		
–	1,00027	1,00024	C	1,00019	за середнього значення 1,000094
	1,00012	1,00034		1,00029	
C	1,00022	1,00017	1,00022	0,99968	
	1,00022	0,99918			

Обчислення значень Y за отриманими моделями здійснено за допомогою зворотного алгоритму Йетса. Результати обчислень представлено в табл. 11–14, позначення дослідів наведено лише в табл. 11 в останньому стовпчику (в табл. 12–14 ці позначення не наведено). Перевірку на адекватність моделей здійснено за F -критерієм Фішера шляхом порівняння розрахункових значень з табличними $F_{(0,05,n,16)} = 2,74$ – $2,665$ або $F_{(0,05,n,24)} = 2,620$ – $2,425$ за $n = 6,7$.

Таблиця 11. Обчислення значень Y по моделі для кута нахилу λ

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/23	Позначення досліду
<i>ABC</i>	0	0	0	-6,41433	-0,80179	<i>abc</i>
<i>BC</i>	0	0	-6,41433	-6,41433	-0,80179	<i>bc</i>
<i>AC</i>	0	-0,99535	0	-4,42362	-0,55295	<i>ac</i>
<i>C</i>	0	-5,41898	-6,41433	-4,42362	-0,55295	<i>c</i>
<i>AB</i>	0	0	0	-6,41433	-0,80179	<i>ab</i>
<i>B</i>	-0,99535	0	-4,42362	-6,41433	-0,80179	<i>b</i>
<i>A</i>	0	-0,99535	0	-4,42362	-0,55295	<i>a</i>
<i>T</i>	-5,41898	-6,20293	-4,42362	-4,42362	-0,55295	(1)

Таблиця 12. Обчислення значень Y по моделі для коефіцієнту k_p

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/23
<i>ABC</i>	0	0	0	-0,005298	-0,000662
<i>BC</i>	0	0	-0,005298	-0,005298	-0,000662
<i>AC</i>	0	0,013571	0,000000	-0,032441	-0,004055
<i>C</i>	0	-0,018869	-0,005298	-0,032441	-0,004055
<i>AB</i>	0	0	0	-0,005298	-0,000662
<i>B</i>	0,013571	0	-0,032441	-0,005298	-0,000662
<i>A</i>	0	0,013571	0	-0,032441	-0,004055
<i>T</i>	-0,018869	-0,018869	-0,032441	-0,032441	-0,004055

Таблиця 13. Обчислення значень Y по моделі для непостійності діаметра кулі V_{Dws}

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/23
<i>ABC</i>	0	0,0	-104,0	262,0	32,8
<i>BC</i>	0	-104,0	366,0	262,0	32,8
<i>AC</i>	0	0,0	-104,0	262,0	32,8
<i>C</i>	-104,0	366,0	366,0	262,0	32,8
<i>AB</i>	0	0,0	-104,0	470,0	58,8
<i>B</i>	0	-104,0	366,0	470,0	58,8
<i>A</i>	0	0,0	-104,0	470,0	58,8
<i>T</i>	366,0	366,0	366,0	470,0	58,8

Отримані моделі з кодованими значеннями факторів мають наступний вигляд:

$$\lambda = -0,67737 - 0,12442x_2;$$

$$k_p = -0,002359 + 0,001696x_2;$$

$$V_{DwL} = 45,8 - 13,0x_3;$$

$$f_T = 1,000096 - 0,000128x_2 - 0,000145x_3,$$

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

$$\lambda = -0,119263 - 0,023699\omega_3;$$

$$k_p = -0,009969 + 3,2314 \cdot 10^{-4}\omega_3;$$

$$V_{DwL} = 102,0782 - 0,4134\omega_k;$$

$$f_r = 1,001298 - 2,445 \cdot 10^{-5}\omega_3 - 4,599 \cdot 10^{-6}\omega_k.$$

Таблиця 14. Обчислення значень Y по моделі для форм-фактору f_r

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	-0,001157	7,998587	0,999823
<i>BC</i>	0	-0,001157	7,999744	7,998587	0,999823
<i>AC</i>	0	-0,001027	-0,001157	8,000640	1,000080
<i>C</i>	-0,001157	8,000771	7,999744	8,000640	1,000080
<i>AB</i>	0	0,000000	-0,001157	8,000901	1,000113
<i>B</i>	-0,001027	-0,001157	8,001797	8,000901	1,000113
<i>A</i>	0	-0,001027	-0,001157	8,002954	1,000369
<i>T</i>	8,000771	8,000771	8,001797	8,002954	1,000369

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Якщо зношування алмазного круга під час шліфування керамічних куль з круговою подачею оцінювати різницею координат профілю в центрі й на периферії круга ($y_{r=0} - y_{r=150}$), стає очевидною тенденція до зниження цього показника з проведенням дослідів загалом з 237 до 158–162 мкм (див. рис. 4). Сприятливим для зниження різниці ($y_{r=0} - y_{r=150}$) до рівня 160 мкм є підвищення до максимуму частоти подачі заготовок ω_3 у межах дослідженого діапазону змінювання вказаних факторів за мінімального рівня швидкості обертання круга ω_k , а інші комбінації факторів дають приблизно рівноцінні результати.

Для зниження кута нахилу λ у межах дослідженого діапазону змінювання до рівня 0,2 рад сприятливим є зменшення частоти подачі заготовок ω_3 за умови підвищення подачі круга на врізання s_b й зменшення ω_k , а інші комбінації факторів дають або приблизно рівноцінні результати (0,7–0,9 рад), або незначне зниження λ (до 0,65 рад).

Зменшенню викривлення профілю круга під час зношування сприяє підвищення ω_3 за умови зменшення s_b й ω_k , а інші комбінації факторів дають або приблизно рівноцінні результати, або спричиняють зростання k_p .

Підвищення ω_k сприяє мінімізації непостійності діаметра кулі V_{DwL} , а одночасне підвищення до певної межі s_b , ω_3 і ω_k – зменшенню значення форм-фактору f_r до одиниці (тобто покращення компактності круглограм, отже, форми куль), а інші комбінації факторів дають або приблизно рівноцінні результати, або дещо підвищують V_{DwL} і f_r .

Апроксимація експериментальних залежностей обраних показників процесу шліфування від режиму обробки лінійними моделями дозволила виключити з розгляду статистично незначимі ефекти і визначити комбінації факторів у межах дослідженого діапазону змінювання, які є підґрунтям для наступної оптимізації значень вказаних показників.

Поверхня відгуків лінійної моделі змінювання f_r відображає тенденцію до покращення компактності круглограм зі збільшенням ω_3 і ω_k за несуттєвого впливу s_b (рис. 5).

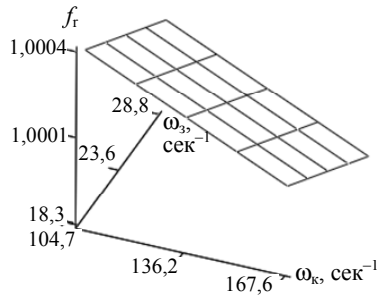


Рис. 5. Лінійна модель змінювання f_r залежно від факторів режиму обробки.

Отже, за обраної схеми алмазного шліфування керамічних куль вирівнюванню зношування алмазного круга у радіальному напрямку сприяє зменшення ω_3 за умови підвищення s_b й зменшення ω_k , але для уникнення формування криволінійності профілю круга слід діяти рівно навпаки – підвищувати ω_3 за умови зменшення s_b й ω_k . Підвищенню точності оброблюваних куль сприяє підвищення до максимуму частоти обертання круга ω_k за мінімального значення s_b , а ефект від змінювання ω_3 є неоднозначним.

ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження впливу режиму алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію з круговою подачею на зношування поверхні алмазного круга й точність форми керамічних куль показано, що ефекти, які спостерігали під час варіювання факторами режиму обробки, можуть бути адекватно описані лінійними залежностями обраних показників процесу від режиму обробки: кута нахилу поверхні круга – від подачі на врізання й частоти подачі заготовок, коефіцієнту приросту кривизни – лише від частоти подачі заготовок, непостійності діаметра кулі – лише від частоти обертання круга, а форм-фактору – від обох останніх параметрів.

Визначено комбінації факторів режиму обробки у межах дослідженого діапазону змінювання, які є підґрунтям для наступної оптимізації значень вказаних показників.

S. V. Sokhan', V. V. Voznyy, V. H. Sorochenko, M. P. Hamaniuk
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 wear of the surface of the diamond wheel and the accuracy of the shape of the balls are presented. The indicators of the wear of the wheel surface were the angle of inclination of the working surface in the radial direction and the curvature coefficient, the accuracy of the shape of the grinded balls – the variation of the ball diameter and the form factor of out-of-roundness profile. The observed effects are described by adequate linear dependences of the inclination angle on the cutting feed and the workpiece feed frequency, the curvature coefficient on the workpiece

feed frequency only, the variation of the ball diameter on the wheel rotation frequency only, and the form factor on both last factors. 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 carbide, diamond grinding, circular feeding of workpieces, discrete feed of the cutting wheel, frequencies of workpieces feeding and wheel rotation, wear of the wheel, variation of ball diameter, form factor of out-of-roundness profile of the ball.

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, art. 1227.
3. 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.
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. 62, no. 12. P. 1773–1777.
6. Pedroso 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. Inst. 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. Mech. 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 Si₃N₄ 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. 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.
16. 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.
17. Сафонова М.Н., Петасюк Г.А., Сыромятникова А.С. Компьютерно-аналитические методы диагностики эксплуатационных характеристик алмазных порошков и композиционных материалов на их основе / отв. ред. М.П. Лебедев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 222 с.
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 13.03.23

Після доопрацювання 13.03.23

Прийнята до опублікування 24.03.23