

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

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

Алмазне шліфування керамічних куль зі змінюванням геометричних параметрів процесу

Для алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію з базуванням на площині й круговою подачею з коливанням представлено результати експериментального дослідження впливу геометричних параметрів процесу шліфування на точність форми куль й форму зношеної поверхні алмазного круга. Показниками точності форми шліфованих куль були непостійність діаметра кулі й форм-фактор круглограми, а форми зношеної поверхні круга – кут нахилу лінії профілю поверхні у радіальному напрямку й швидкість змінювання цього кута. Означений вплив описано адекватними лінійними функціями показників процесу від співвідношення кількості куль на окружностях їхнього розташування й ексцентриситету розташування поля траєкторій куль від осі обертання алмазного круга за незмінного перекриття осі обертання круга зовнішньою окружністю розташування куль. Наведено значення геометричних показників, за яких застосування дослідженої схеми шліфування куль є доцільним.

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

ВСТУП

Перевагою гібридних підшипників з керамічними тілами кочення в сучасних конструкціях авіаційних газотурбінних двигунів є підвищення експлуатаційних характеристик (теплостійкості, надійності й терміну служби) завдяки збереженню механічних властивостей підшипників за високих температур, високої зносо- і корозійній стійкості [1]. Технологія алмазної обробки прецизійних куль з керамічних матеріалів не є новою, але постійне удосконалення власне керамічних композиційних матеріалів потребує і неодмінного удосконалення технології їхньої алмазної обробки [2].

Огляд світового досвіду удосконалення технологій механічної обробки керамічних куль до високої степені точності і якості стисло висвітлено в [3–5]: основний принцип абразивної обробки куль між двома дисками залишається незмінним, проте застосовують ряд різновидів методу, а саме: обробку між двома [6, 7] або трьома дисками [8, 9] у канавці V-подібного профілю, між двома дисками у ексцентричній [10, 11] чи спіральній [12, 13] канавці. В інших методах шліфування куль канавку не використовують [14, 15].

Задачею алмазного формотворного шліфування заготовок керамічних куль є надання останнім сферичної форми для наступного уточнення цієї форми алмазним доведенням. Цілком очевидно, що підвищення точності

формотворення сферичної поверхні кулі шліфуванням сприяє зменшенню витрат часу на алмазне доведення.

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України розроблено й запатентовано процес шліфування куль з високов'язкої кераміки торцем алмазного круга [16], 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 [17] така схема базування куль використана авторами для дослідження зношування круга залежно від схеми перекриття ним траєкторії подачі куль і режиму обробки. Однак за обробки заготовок розміром менше 12 мм пляма їхнього контакту з конусними поверхнями наближається до крайок останніх, тому в наслідок зниження контактної жорсткості й зношування конусних лез втрачається їхня основна функція утримувати вільно обертові кулі під час їхньої обробки.

Для шліфування заготовок керамічних куль розміром < 12 мм в [18] застосовано схему алмазного шліфування торцем круга з базуванням куль на площину й круговою подачею без виходу за край круга. Під час шліфування вільно обертові кулі, 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 кулями, які штовхають сепаратор у напрямку свого руху. Шліфування торцем круга з базуванням куль у кільцевій канавці V-подібного профілю дозволяє впливати на зношування круга варіюванням режимів обробки [19].

Недоліком процесів шліфування з базуванням куль на одно- або двоточковий контакт і круговою подачею, застосованих у [18, 19], 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. Тому у [20] досліджено процес шліфування торцем круга з круговою подачею й коливанням (осциляцією) куль. Наявність ексцентриситету між віссю кругової подачі й віссю обертання сепаратора 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, яка діє на кулю й сприяє більшій рухливості останньої.

Однак наразі не досліджено закономірності впливу зазначених умов шліфування, як і варіювання геометричними параметрами процесу (як-от перекриттям осі обертання круга окружностями розміщення куль – зовнішньою або внутрішньою, співвідношенням кількості куль на цих окружностях, ексцентриситетом розташування поля траєкторій куль відносно осі обертання круга) на точність керамічних куль і характер зношування круга.

Отже, метою даного дослідження процесу алмазного шліфування керамічних куль з їхнім базуванням на площині й круговою подачею з коливанням було встановлення закономірностей уточнення форми куль й зношування круга залежно від геометричних параметрів процесу за незмінного режиму обробки, ефективність якого доведена в [20]. Як і в [18–20], точність форми кера-

мічних куль оцінювали показником непостійності діаметра кулі як найбільшого з результатів вимірювання на кругломірі у трьох взаємно перпендикулярних перерізах кулі і який вказує на максимальну різницю у поточних діаметрах кулі. Іншим показником був форм-фактор круглограми – співвідношення довжини круглограми й площі, охопленої лінією профілю кулі, яке дозволяє побічно оцінити розвиненість відхилень від сферичної форми кулі.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Алмазне шліфування заготовок керамічних куль з нітриду кремнію проводили на фрезерному верстаті мод. 6Т12 з встановленим на його робочому столі технологічним пристроєм для базування на площині керамічних куль. Налаштування технологічного пристрою з ексцентриситетом планшайби для базування вільно обертових у отворах також вільно обертового сепаратора куль на ній показано на рис. 1, а, схема розташування на обертовому столі планшайби з сепаратором та кулями – на рис. 1, б.

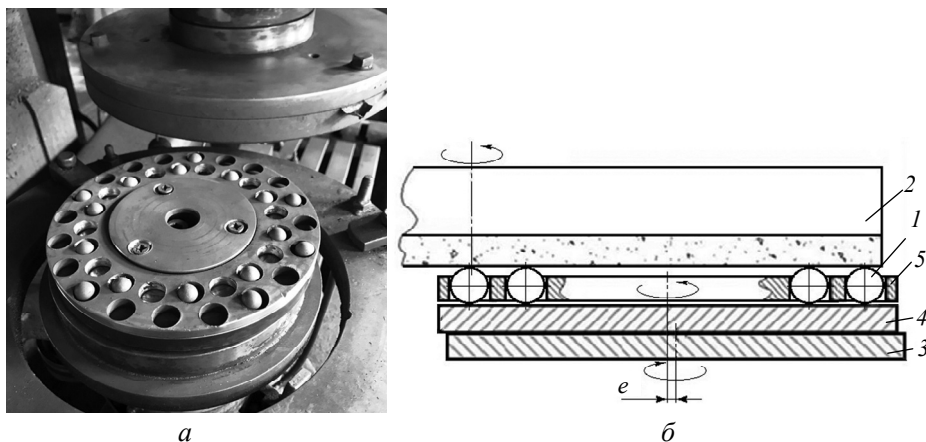


Рис. 1. Налаштування технологічного пристрою з ексцентриситетом планшайби (а) і схема базування куль на площині (б): 1 – оброблювані кулі; 2 – алмазний круг; 3 – обертовий стіл пристрою; 4 – планшайба; 5 – сепаратор.

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 зовнішній і внутрішній окружностях навколо осі його обертання (див. рис. 1). У дослідях ексцентриситет осі обертання сепаратора був 3 мм, розташування отворів у сепараторі на окружностях діаметром у 147 і 119 мм. Через такі геометричні співвідношення перекриття осі обертання круга здійснювалося або зовнішньою окружністю розміщення куль, або внутрішньою – під час зміщення пристрою від зазначеного положення до центру на 14 мм. Тому за допомогою розташування пристрою відносно алмазного круга так, щоб зовнішня (чи внутрішня) окружність розміщення куль на максимальному віддаленні від осі обертання круга була дотичною краю останнього створювали умови для перекриття цієї осі теоретично симетричним полем знаходження траєкторії руху подачі куль шириною 6 мм. У такий спосіб забезпечували невихід куль за межі круга з одного боку й відсутність ділянок на поверхні круга, які б не контактували з оброблюваними кулями, з іншого. Симетричне або

несиметричне розташування поля траєкторій відносно осі обертання круга забезпечувало зміщення пристрою від обох зазначених положень на 3 мм.

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 % на металевій зв'язці M2-01. Кількість одночасно оброблюваних заготовок керамічних куль складала 16 шт. Режим шліфування куль залишався незмінним: частота обертання шліфувального круга $167,6 \text{ с}^{-1}$ ($n_k = 1600 \text{ об./хв}$) і частота обертання столу пристрою $28,8 \text{ с}^{-1}$ ($n_z = 275 \text{ об./хв}$) за дискретної подачі круга на врізання у 10^{-5} м кожні 5 хв (0,01 мм/5 хв). Час проведення кожного досліду – 30 хв.

Показниками точності форми керамічних куль були непостійність діаметра кулі V_{Dws} (позначення згідно ISO 3290-2:2014) й форм-фактор круглограми кулі f_r . Форм-фактор круглограми кулі обраховували для кожної круглограми за формулою $f_r = p_r^2 / 4\pi A_r$, де p_r – довжина круглограми; A_r – площа фігури, охопленої лінією профілю кулі [15]. Показниками форми зношеної поверхні алмазного круга були кут нахилу λ лінії профілю поверхні у радіальному напрямку, а також швидкість змінювання v_λ цього кута. Останній показник обраховували як частку від різниці кутів нахилу профілю круга до й після проведення чергового досліду за час проведення досліду. Для обрахунку показників форми поверхні алмазного круга вимірювали усереднену координату y_m лінії профілю поверхні круга та як результат апроксимації вказаної сукупності точок визначали лінійні й квадратичні лінії тренда $y_r = f(r)$ залежно від радіусу поверхні круга, перше з яких слугувало базою для обрахунку λ і v_λ .

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]. Середню стандартну похибку вимірювання V_{Dws} обраховували як середнє арифметичне середньозважених стандартних похибок вимірювання V_{Dws} п'яти куль у трьох перерізах кожної як до проведення дослідів, так і після кожного з восьми дослідів за виключенням результатів, які явно відрізнялися серед інших. Середню стандартну похибку вимірювання V_{Dws} оцінено у 1,4 мкм. Аналогічно середню стандартну похибку визначення f_r обраховували як середнє арифметичне середньозважених стандартних похибок f_r п'яти куль у трьох перерізах кожної як до проведення дослідів, так і після кожного з восьми дослідів, і її оцінено у $1,5 \cdot 10^{-3}$.

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. Тридцять реперних точок у кожному радіальному напрямку були рівновіддаленими одна від одної, перша з них знаходилася на осі обертання круга, а остання – за 5 мм від 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. Під час обрахунку середніх значень координати y_m їх перевіряли на наявність результатів, що різко виділяються серед інших (тут і далі згідно рекомендацій [21]) – дисперсії вибірок перевіряли на однорідність за G -критерієм Кохрена. Якщо перевірка показувала (з довірчою імо-

вірністю 0,95), що вони є однорідними, за найкращу оцінку дисперсії відтворюваності вважали середньозважену дисперсію $S_{\text{відтв}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{відтв}i}^2$. Середню

стандартну похибку вимірювання координати y_m обраховували як середнє арифметичне похибок вимірювання y_m початкового профілю круга й після кожного з восьми дослідів, які у свою чергу були середнім значенням стандартних похибок вимірювання координати y_i у реперних точках і її оцінено у 45,5 мкм.

Досліджували вплив на уточнення форми керамічних куль й змінювання форми зношеної поверхні алмазного круга геометричних параметрів процесу: перекриття c_r осі обертання круга окружностями подачі куль – зовнішньою або внутрішньою, співвідношення q_k кількості куль на зовнішній і внутрішній окружностях, ексцентриситету розташування поля траєкторій e_r відносно осі обертання алмазного круга як оцінку симетричності чи несиметричності цього поля. Цей вплив досліджували шляхом проведення повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^3 для виявлення відмінностей, що перевищують подвійну стандартну похибку. Рівні варіювання трьох факторів були наступними: перекриття c_r осі обертання круга – зовнішньою (–1) або внутрішньою (+1) окружностями розташування куль, співвідношення q_k кількості куль у отворах на зовнішній і внутрішній окружностях – 6/10 й 10/6, ексцентриситет поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга як оцінку симетричності ($e_r = 0$ мм) чи несиметричності ($e_r = 3$ мм) цього поля.

Розраховані за отриманою лінійною 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 .

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

Адекватність математичних моделей перевіряли за F -критерієм Фішера, обчислюючи значення Y за зворотним алгоритмом Йетса, який найбільш просто здійснюється за допомогою запису ефектів у зворотному порядку, виконання того ж набору додавань та віднімань і зчитуванням передбачених значень у порядку, зворотному звичайному. У такий спосіб отримували рівняння математичних моделей досліджуваних показників, які адекватно описували вплив геометричних параметрів.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті дослідження отримано закономірності змінювання профілю робочої поверхні круга залежно від геометричних показників процесу шліфування керамічних куль як у вигляді сукупності експериментальних точок y_{mi}

для реперних значень радіуса r , так і у вигляді ліній тренду утворюваної профіля круга, представлених функцією кубічної регресії (рис. 2).

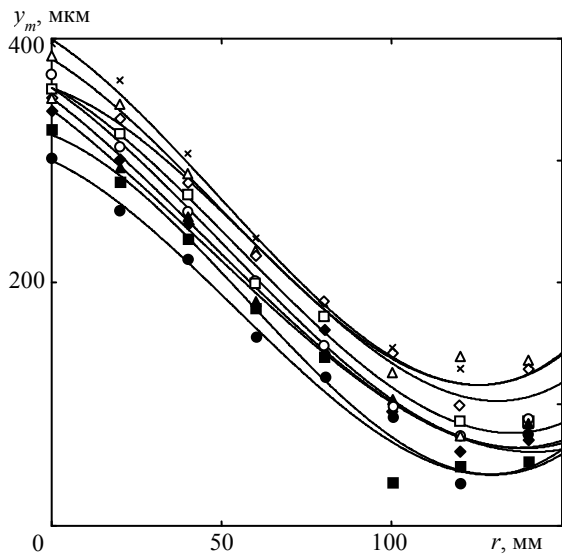


Рис. 2. Визначені експериментально координати початкового (×) профілю круга й після проведення дослідів 1 (△), 2 (◇), 3 (□), 4 (○), 5 (▲), 6 (◆), 7 (■), 8 (●), а також апроксимовані поліномами 3-го ступеня лінії тренду.

Функції лінійної та кубічної регресії, залучені для опису лінії тренду початкового профілю круга, мають вид $y_{r0} = -2,239r - 11,5$ і $y_{r0} = 0,000224r^3 - 0,0371r^2 - 1,087r - 5,7$. Такі ж функції після проведення дослідів представлено в табл. 1. Щоб уникнути появи похибки розрахунків через розкид значень y_{mi} для подальшого аналізу спиралися на апроксимовані залежності y_r .

Усереднені значення непостійності діаметра кулі V_{Dws} , розраховані значення форм-фактора f_r , кута нахилу λ , швидкості змінювання v_λ цього кута у дослідях представлено в табл. 2, де застосовано позначення опису експериментальних умов малими буквами як найбільш компактне, оскільки за такої умови відсутність відповідної літери вказує на нижній рівень фактора, а її наявність – на верхній рівень.

Таблиця 1. Функції лінійної та кубічної регресії, якими апроксимовано змінювання координат профілю круга

№ досліджу	c_T	q_k	e_T , мм	Лінійна регресія y_r	Кубічна регресія y_r
1	-1	6/10	0	$y_{r1} = -2,049r - 31,8$	$y_{r1} = 0,000185r^3 - 0,0273r^2 - 1,565r - 16,9$
2	+1	6/10	0	$y_{r2} = -2,014r - 45,7$	$y_{r2} = 0,000197r^3 - 0,0353r^2 - 0,637r - 48,5$
3	-1	10/6	0	$y_{r3} = -2,210r - 48,8$	$y_{r3} = 0,000167r^3 - 0,0284r^2 - 1,258r - 46,5$
4	+1	10/6	0	$y_{r4} = -2,256r - 53,0$	$y_{r4} = 0,000145r^3 - 0,0222r^2 - 1,756r - 44,0$
5	-1	6/10	3	$y_{r5} = -2,126r - 68,5$	$y_{r5} = 0,000118r^3 - 0,0163r^2 - 1,981r - 55,4$
6	+1	6/10	3	$y_{r6} = -2,118r - 74,3$	$y_{r6} = 0,000102r^3 - 0,0143r^2 - 1,961r - 64,0$
7	-1	10/6	3	$y_{r7} = -2,212r - 82,8$	$y_{r7} = 0,000209r^3 - 0,0373r^2 - 0,770r - 85,4$
8	+1	10/6	3	$y_{r8} = -1,976r - 107,2$	$y_{r8} = 0,000178r^3 - 0,0294r^2 - 1,069r - 102,5$

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

Позначення досліджу	Показники точності форми куль		Показники форми круга	
	V_{Dws} , мкм	f_r	λ , рад	v_{λ} , с ⁻¹
(1)	30,4	0,99214	-1,1170	$1,89 \cdot 10^{-5}$
<i>a</i>	21,7	0,98616	-1,1022	$3,74 \cdot 10^{-6}$
<i>b</i>	35,2	0,98740	-1,1460	$-1,99 \cdot 10^{-5}$
<i>ab</i>	25,8	0,95206	-1,1536	$-4,31 \cdot 10^{-6}$
<i>c</i>	24,0	0,98167	-1,1310	$1,27 \cdot 10^{-5}$
<i>ac</i>	27,4	0,98211	-1,1294	$8,42 \cdot 10^{-7}$
<i>bc</i>	17,4	0,99099	-1,1458	$-9,09 \cdot 10^{-6}$
<i>abc</i>	16,9	0,98665	-1,1019	$2,44 \cdot 10^{-5}$

Результати обчислень коефіцієнтів лінійних моделей за алгоритмом Йетса 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 непостійності діаметра кулі V_{Dws}

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	$(3)/2^3$	Позначення ефекту
(1)	30,4	52,0	113,1	198,8	24,8	<i>T</i>
<i>a</i>	21,7	61,0	85,7	-15,2	-1,9	<i>A</i>
<i>b</i>	35,2	51,4	-18,0	-8,1	-1,0	<i>B</i>
<i>ab</i>	25,8	34,3	2,9	-4,6	-0,6	<i>AB</i>
<i>c</i>	24,0	-8,7	9,0	-27,4	-3,4	<i>C</i>
<i>ac</i>	27,4	-9,4	-17,1	20,9	2,6	<i>AC</i>
<i>bc</i>	17,4	3,4	-0,7	-26,0	-3,3	<i>BC</i>
<i>abc</i>	16,9	-0,5	-3,8	-3,1	-0,4	<i>ABC</i>

Таблиця 4. Обчислення коефіцієнтів моделі форм-фактора f_r

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	$(3)/2^3$
(1)	0,9921	1,9783	3,9178	7,8592	0,9824
<i>a</i>	0,9862	1,9395	3,9414	-0,0452	-0,0057
<i>b</i>	0,9874	1,9638	-0,0413	-0,0250	-0,0031
<i>ab</i>	0,9521	1,9776	-0,0039	-0,0342	-0,0043
<i>c</i>	0,9817	-0,0060	-0,0388	0,0237	0,0030
<i>ac</i>	0,9821	-0,0353	0,0139	0,0374	0,0047
<i>bc</i>	0,9910	0,0004	-0,0294	0,0527	0,0066
<i>abc</i>	0,9867	-0,0043	-0,0048	0,0246	0,0031

На основі середньої стандартної похибки вимірювання V_{Dws} розрахована стандартна похибка контраст-сум стовпчика (3) табл. 3, тобто $1,4 \text{ мкм} \cdot \sqrt{8} = 4,0 \text{ мкм}$, а стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика

$-1,4/\sqrt{8} = 0,5$ мкм. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів є 1,0 мкм. Як видно з табл. 3 більшість виявлених відмінностей V_{Dws} перевищують подвійну стандартну похибку і за попередньою оцінкою є реальними, однак відмінність AB попадає у сумнівну область – вона перевищує її очікувану стандартну похибку, але менше її подвоєного значення. Відмінність ABC є меншою за стандартну похибку.

Стандартні похибки контраст-сум стовпчика (3) табл. 4 й регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика розраховані на основі середньої стандартної похибки форм-фактора f_r , тобто $1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{8} = 4,2 \cdot 10^{-3}$ і $1,5 \cdot 10^{-3} / \sqrt{8} = 5,3 \cdot 10^{-4}$. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів є $1,06 \cdot 10^{-3}$.

Таблиця 5. Обчислення коефіцієнтів моделі кута нахилу λ

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	-1,1170	-2,2272	-4,5269	-9,0350	-1,1294
<i>a</i>	-1,1102	-2,2997	-4,5080	0,0444	0,0056
<i>b</i>	-1,1460	-2,2604	-0,0010	-0,0598	-0,0075
<i>ab</i>	-1,1537	-2,2476	0,0455	0,0279	0,0035
<i>c</i>	-1,1310	0,0067	-0,0726	0,0189	0,0024
<i>ac</i>	-1,1294	-0,0078	0,0127	0,0465	0,0058
<i>bc</i>	-1,1458	0,0015	-0,0145	0,0853	0,0107
<i>abc</i>	-1,1019	0,0439	0,0424	0,0569	0,0071

Середня стандартна похибка кута нахилу розрахована на основі середньої стандартної похибки вимірювання $y_m = 45,5$ мкм й відстані між першою й останньою точками вимірювання $l = 145$ мм як $\arctg(45,5/(1,45 \cdot 10^5)) = 3,14 \cdot 10^{-4}$. Тоді стандартна похибка контраст-сум стовпчика (3) табл. 5 є $3,14 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{8} = 8,88 \cdot 10^{-4}$, а стандартна похибка регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика – $3,14 \cdot 10^{-4} / \sqrt{8} = 1,11 \cdot 10^{-4}$. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів є $2,22 \cdot 10^{-4}$. Як видно з табл. 5, виявлені відмінності λ перевищують подвійну стандартну похибку і за попередньою оцінкою є реальними.

Стандартні похибки контраст-сум стовпчика (3) табл. 6 розраховані як $(3,14 \cdot 10^{-4} / 1800) \cdot \sqrt{8} = 4,93 \cdot 10^{-7}$, а регресійних коефіцієнтів наступного стовпчика – $(3,14 \cdot 10^{-4} / 1800) / \sqrt{8} = 6,17 \cdot 10^{-8}$. Подвійна стандартна похибка регресійних коефіцієнтів є $1,23 \cdot 10^{-7}$. Як видно з табл. 4 виявлені відмінності ν_λ перевищують подвійну стандартну похибку і за попередньою оцінкою є реальними.

Загальновідомо, що у задачах інтерполяції математична модель має адекватно описувати об'єкт у сфері експерименту з бажано більшою деталізацією досліджуваних ефектів з певною мірою нелінійності за рахунок спільного впливу головних ефектів і взаємодій факторів. У такому розумінні перевірка коефіцієнтів лінійної моделі за критерієм Стюдента показала наступне. За довірчої ймовірності $p = 95\%$ ($t_{c 95;39} = 2,0228$) у моделі змінювання непостійності діаметра кулі V_{Dws} статистично значимим є вплив головних ефектів A і C , а вплив двофакторних взаємодій AC і BC є порівняним з головними ефектами.

У лінійної моделі змінювання форм-фактора f_r статистично значимим є вплив головного ефекту A як і вплив двофакторних взаємодій AB , AC і BC , який є також порівняним або більше за головний. За довірчої ймовірності $p = 95\%$ ($t_{c\ 95;23} = 2,0687$) у лінійної моделі змінювання кута нахилу λ статистично значимим є вплив головного ефекту B , як і вплив двофакторної взаємодії BC , який є більшим за головний. Насамкінець у лінійної моделі змінювання швидкості v_λ статистично значимим є вплив головного ефекту B як і вплив двофакторних взаємодій AB і BC .

Таблиця 6. Обчислення коефіцієнтів моделі швидкості v_λ

Позначення досліджу	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
(1)	$1,89 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$-1,53 \cdot 10^{-6}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$3,41 \cdot 10^{-6}$
a	$3,74 \cdot 10^{-6}$	$-2,42 \cdot 10^{-5}$	$2,88 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	$2,76 \cdot 10^{-6}$
b	$-1,99 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$3,91 \cdot 10^{-7}$	$-4,50 \cdot 10^{-5}$	$-5,63 \cdot 10^{-6}$
ab	$-4,31 \cdot 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$7,61 \cdot 10^{-5}$	$9,51 \cdot 10^{-6}$
c	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$-1,52 \cdot 10^{-5}$	$-4,68 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$3,79 \cdot 10^{-6}$
ac	$8,42 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-6}$	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$2,66 \cdot 10^{-6}$
bc	$-9,09 \cdot 10^{-6}$	$-1,18 \cdot 10^{-5}$	$3,07 \cdot 10^{-5}$	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$6,08 \cdot 10^{-6}$
abc	$2,44 \cdot 10^{-5}$	$3,35 \cdot 10^{-5}$	$4,53 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-6}$

Зважаючи на те, що фактор A є дискретним а інші два неперервними змінними, немає сенсу будувати звичну модель змінювання, яка включає фактор A . Оскільки за дискретного A член взаємодії за його участі не має звичайної інтерпретації, слід навести пару лінійних рівнянь для різних рівнів A [21]. Для показника V_{Dws} такою парою лінійних рівнянь є

$$V_{Dws|A-} = 198,8 - 15,2(-1) - 27,4x_3 + 20,9(-1)x_3 - 26,0x_2x_3 = \\ = 214 - 48,3x_3 - 26,0x_2x_3;$$

$$V_{Dws|A+} = 198,8 - 15,2(+1) - 27,4x_3 + 20,9(+1)x_3 - 26,0x_2x_3 = \\ = 183,6 - 6,5x_3 - 26,0x_2x_3.$$

Нас цікавить саме та частина факторного простору, відгуки в точках якої показують найменші значення V_{Dws} . Очевидно, що лінійне рівняння $V_{Dws|A-}$ показує саме такі результати.

Для показника f_r такою парою лінійних рівнянь є

$$f_{r|A-} = 7,9044 + 0,0342x_2 - 0,0374x_3 + 0,0527x_2x_3;$$

$$f_{r|A+} = 7,814 - 0,0342x_2 + 0,0374x_3 + 0,0527x_2x_3.$$

Тут авторів цікавила саме та частина факторного простору, відгуки в точках якої показують найбільші значення f_r . Неважко пересвідчитися, що лінійне рівняння $f_{r|A-}$ показує саме такі результати.

Для показника v_λ такою парою лінійних рівнянь є

$$v_{\lambda|A-} = 2,73 \cdot 10^{-5} + 3,11 \cdot 10^{-5}x_2 + 4,86 \cdot 10^{-5}x_2x_3;$$

$$v_{\lambda|A+} = 2,73 \cdot 10^{-5} - 12,11 \cdot 10^{-5}x_2 + 4,86 \cdot 10^{-5}x_2x_3.$$

С позицій стабільно незмінної форми шліфувального круга під час його зношування авторів цікавила саме та частина факторного простору, відгуки в

точках якої показують значення v_{λ} поблизу нуля. Очевидно, що обидва лінійні рівняння показують невиразні результати.

Оскільки коефіцієнти регресії математичних моделей змінювання всіх показників відображають статистично значимий вплив як головних ефектів факторів так і двофакторної взаємодії, перевіряли спільний вплив означених ефектів й взаємодії з використанням зворотного алгоритму Йетса. Іноді виявляється, що відгуки в точках, розташованих у деякій частині факторного простору, є екстремальними (несподівано великими або маленькими), тоді як значення відгуків в інших точках невиразні.

Отже, для моделі змінювання V_{Dws} знайдено середній відгук для ефекту взаємодії BC (табл. 7). Ліворуч у табл. 7 наведено вісім спостережених значень, згрупованих у двовимірну таблицю $B \times C$. Праворуч ті ж дані показано усередненими попарно. Висновок про спільний вплив головних факторів для моделі змінювання V_{Dws} є таким: сприятливим для зменшення V_{Dws} є збільшення ефектів B і C за умови, коли ефект A знаходиться на нижньому рівні. Інші комбінації змінювання ефектів дають невиразні результати.

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

	–	B	B	
–	30,4	35,2	C	26,1
	21,7	25,8		30,5
C	24,0	17,4		25,7
	27,4	16,9		17,2

за середнього
значення 24,9

Статистична значимість впливу двофакторної взаємодії BC поряд з таким же впливом ефекту C на змінювання V_{Dws} свідчить про зростання в деякій частині факторного простору впливу ефекту B . Тому розглянемо спільний вплив ефекту C і двофакторної взаємодії BC за умови, коли ефект C у двофакторній взаємодії знаходиться на верхньому (+1) рівні. Тоді лінійне рівняння змінювання V_{Dws} матиме наступний вигляд:

$$V_{Dws}|_{A-C+}=214-48,3x_3-26,0x_2x_3|_{C+}=214-26,0x_2-48,3x_3.$$

Висновок про спільний вплив головних факторів для моделі змінювання f_r є таким (табл. 8). Сприятливим для збільшення величини f_r є умова знаходження ефектів B і C або на нижньому, або на верхньому рівні, несприятливим – верхній рівень ефекту B , коли ефект C є на нижньому рівні. В обох випадках ефект A має бути на нижньому рівні. Інші комбінації змінювання ефектів дають невиразні результати.

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

	–	B	B	
–	0,99214	0,98749	C	0,98915
	0,98616	0,95206		0,96973
C	0,98167	0,99099		0,98189
	0,98211	0,98665		0,98882

за середнього
значення 0,982398

Тут статистична значимість впливу двофакторної взаємодії BC на змінювання f_r свідчить про зростання в деякій частині факторного простору впливу ефекту C . Неважко переконатися, що за умови, коли ефект B у двофакторній взаємодії знаходиться нижньому (-1) рівні, спільний вплив ефектів B, C і їхньої двофакторної взаємодії BC призводить до зменшення f_r . Тому розглянемо спільний вплив ефектів і їхньої взаємодії за умови, коли ефект B у двофакторній взаємодії знаходиться на верхньому ($+1$) рівні. Тоді лінійне рівняння змінювання f_r матиме наступний вигляд:

$$f_r|_{A-B+} = 7,9044 + 0,0342x_2 - 0,0374x_3 + 0,0527x_2|_{B+}x_3 = 7,9044 + 0,0342x_2 + 0,0153x_3.$$

Висновок про спільний вплив головних факторів на λ полягає в наступному (табл. 9). Сприятливим для зменшення величини λ є зниження ефекту C за умови, коли ефект B знаходиться на нижньому рівні, а інші комбінації змінювання ефектів дають приблизно рівноцінні результати.

Таблиця 9. Обчислення середніх відгуків взаємодії BC для кута нахилу λ

	–	B	B	
–	–1,11675 –1,10999	–1,14587 –1,15357	–1,11337 –1,14972	за середнього значення –1,13155
C	–1,13115 –1,13972	–1,14618 –1,10239	–1,13044 –1,12429	

Статистична значимість впливу двофакторної взаємодії BC поряд з таким же впливом ефекту B на змінювання λ свідчить про зростання в деякій частині факторного простору впливу ефекту C . Тому розглянемо спільний вплив ефектів B, C і їхньої двофакторної взаємодії BC за умови, коли ефект B у двофакторній взаємодії знаходиться на нижньому (-1) рівні. Тоді лінійне рівняння змінювання λ матиме наступний вигляд:

$$\lambda|_{B-} = -9,0350 - 0,0598x_2 + 0,0853x_2|_{B-}x_3 = -9,0350 - 0,0598x_2 - 0,0853x_3.$$

Висновок про спільний вплив головних факторів на v_λ є таким (табл. 10). Сприятливим для зменшення величини v_λ є підвищення до певної міри ефекту B за умови, коли ефект C знаходиться на нижньому рівні, а інші комбінації змінювання ефектів дають приблизно рівноцінні результати.

Таблиця 10. Обчислення середніх відгуків взаємодії BC для швидкості v_λ

	–	B	B	
–	$1,89 \cdot 10^{-5}$ $3,74 \cdot 10^{-6}$	$-1,99 \cdot 10^{-5}$ $-4,31 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$ $-1,21 \cdot 10^{-5}$	за середнього значення $3,41 \cdot 10^{-6}$
C	$1,27 \cdot 10^{-5}$ $8,42 \cdot 10^{-7}$	$-9,09 \cdot 10^{-6}$ $2,44 \cdot 10^{-5}$	$6,77 \cdot 10^{-6}$ $7,66 \cdot 10^{-6}$	

Статистична значимість впливу двофакторної взаємодії BC поряд з таким же впливом ефекту B на змінювання v_λ свідчить про зростання в деякій час-

тині факторного простору впливу ефекту *C*. Неважко переконатися, що за умови, коли ефект *B* у двофакторній взаємодії знаходиться на верхньому (+1) рівні, а ефект *C* – на нижньому (–1), спільний вплив ефектів *B*, *C* і їхньої двофакторної взаємодії *BC* у лінійному рівнянні змінювання $v_{\lambda}|_{A-}$ сприяє наближенню v_{λ} до нуля. Неважко пересвідчитися, що для лінійному рівнянні змінювання $v_{\lambda}|_{A+}$ таке наближення не спостерігається. Тоді лінійне рівняння змінювання v_{λ} матиме наступний вигляд:

$$v_{\lambda}|_{A-B+} = 2,73 \cdot 10^{-5} + 3,11 \cdot 10^{-5} x_2 + 4,86 \cdot 10^{-5} x_2|_{B+} x_3 = 2,73 \cdot 10^{-5} + 3,11 \cdot 10^{-5} x_2 + 4,86 \cdot 10^{-5} x_3.$$

Зважаючи на ці висновки щодо спільного впливу головних ефектів і взаємодії факторів на змінювання показників, дотримуємося гіпотези, що всі обрані показники процесу можуть бути описані лінійними моделями з певною мірою нелінійності за рахунок доведеного спільного впливу головних ефектів і взаємодії факторів або без такого, 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 $F_{(0,05,7,16)} = 2,665$ або $F_{(0,05,6,32)} = 2,400$. 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).

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

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³	Позначення дослідів
<i>ABC</i>	0	0	–48,3	139,7	17,5	<i>abc</i>
<i>BC</i>	0	–48,3	187,9	139,7	17,5	<i>bc</i>
<i>AC</i>	0	–26	–48,3	191,7	24,0	<i>ac</i>
<i>C</i>	–48,3	214,0	187,9	191,7	24,0	<i>c</i>
<i>AB</i>	0	0	–48,3	236,2	29,5	<i>ab</i>
<i>B</i>	–26,0	–48,3	240,0	236,2	29,5	<i>b</i>
<i>A</i>	0	–26	–48,3	288,3	36,0	<i>a</i>
<i>T</i>	214,0	214,0	240,0	288,3	36,0	(1)

Таблиця 12. Обчислення значень *Y* за моделлю форм-фактора *f_r*

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	0,0153	7,9539	0,99424
<i>BC</i>	0	0,0153	7,9386	7,9539	0,99424
<i>AC</i>	0	0,0342	0,0153	7,8855	0,98569
<i>C</i>	0,0153	7,9044	7,9386	7,8855	0,98569
<i>AB</i>	0	0	0,0153	7,9233	0,99041
<i>B</i>	0,0342	0,0153	7,8702	7,9233	0,99041
<i>A</i>	0	0,0342	0,0153	7,8549	0,98186
<i>T</i>	7,9044	7,9044	7,8702	7,8549	0,98186

Таблиця 13. Обчислення значень Y за моделлю кута нахилу λ

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	-0,0853	-9,1801	-1,1475
<i>BC</i>	0	-0,0853	-9,0948	-9,1801	-1,1475
<i>AC</i>	0	-0,0598	-0,0853	-9,0604	-1,1326
<i>C</i>	-0,0853	-9,0350	-9,0948	-9,0604	-1,1326
<i>AB</i>	0	0	-0,0853	-9,0095	-1,1262
<i>B</i>	-0,0598	-0,0853	-8,9751	-9,0095	-1,1262
<i>A</i>	0	-0,0598	-0,0853	-8,8898	-1,1112
<i>T</i>	-9,0350	-9,0350	-8,9751	-8,8898	-1,1112

Таблиця 14. Обчислення значень Y за моделлю швидкості v_λ

Позначення ефекту	(0)	(1)	(2)	(3)	(3)/2 ³
<i>ABC</i>	0	0	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$
<i>BC</i>	0	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$5,84 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$
<i>AC</i>	0	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$4,48 \cdot 10^{-5}$	$5,61 \cdot 10^{-6}$
<i>C</i>	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$5,84 \cdot 10^{-5}$	$4,48 \cdot 10^{-5}$	$5,61 \cdot 10^{-6}$
<i>AB</i>	0	0	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$9,75 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$
<i>B</i>	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$-3,80 \cdot 10^{-6}$	$9,75 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$
<i>A</i>	0	$3,11 \cdot 10^{-5}$	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$-5,24 \cdot 10^{-5}$	$-6,56 \cdot 10^{-6}$
<i>T</i>	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$-3,80 \cdot 10^{-6}$	$-5,24 \cdot 10^{-5}$	$-6,56 \cdot 10^{-6}$

Отримані моделі з кодованими значеннями факторів мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 V_{Dws} &= 26,75 - 3,25x_2 - 6,0375x_3; \\
 f_r &= 0,98805 + 0,004275x_2 + 0,001913x_3; \\
 \lambda &= -1,129375 - 0,007475x_2 - 0,010663x_3; \\
 v_\lambda &= 3,41 \cdot 10^{-6} + 3,89 \cdot 10^{-6}x_2 + 6,08 \cdot 10^{-6}x_3,
 \end{aligned}$$

або з натуральними значеннями факторів

$$\begin{aligned}
 V_{Dws} &= 39,7 - 6,1q_k - 4,0e_T; \\
 f_r &= 0,97705 + 0,00802q_k + 0,00127e_T; \\
 \lambda &= -1,10282 - 0,01402q_k - 0,00711e_T; \\
 v_\lambda &= -1,09 \cdot 10^{-5} + 7,289 \cdot 10^{-6}q_k + 4,05 \cdot 10^{-6}e_T.
 \end{aligned}$$

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати перевірки спільного впливу головних ефектів і двофакторної взаємодії на процес шліфування куль з використанням зворотного алгоритму Йетса (табл. 7–10) свідчать, що змінюванню більшості показників процесу шліфування у потрібному напрямку сприяє у кожному випадку знаходження дискретного ефекту A на нижньому рівні, тобто перекриття c_r осі обертання круга має бути зовнішньою окружністю розташування отворів у сепараторі.

Як показують розрахунки на основі отриманої моделі непостійності діаметра кулі V_{Dws} (рис. 3, а), її значення в діапазоні 15–20 мкм слід очікувати за умови співвідношення q_k на рівні 1,67 й несиметричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга (ексцентриситет $e_r = 3$ мм).

Якщо виходити з отриманої моделі форм-фактора f_r , то підвищення його значення до одиниці – рівня найменших відхилень форми кулі від геометрично правильної – слід очікувати за підвищення співвідношення q_k до рівня 2,4 (рис. 3, б).

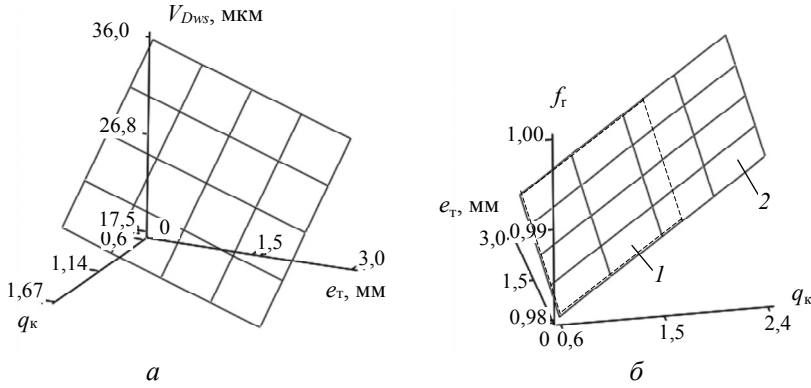


Рис. 3. Моделювання змінювання V_{Dws} (а) й f_r (б) залежно від геометричних показників обраної схеми шліфування: поверхня відгуку в межах дослідженого діапазону (1), прогнозована (2).

Максимального зменшення абсолютного значення λ в межах дослідженого діапазону параметрів слід очікувати за умови співвідношення q_k на рівні 0,6 й симетричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга ($e_r = 0$ мм).

Спираючись на отриману модель швидкості v_λ , можна стверджувати, що отримати нульове значення v_λ можна в межах дослідженого діапазону параметрів. Залежно від мети, яка ставиться в певному стані зносу круга – стабілізація кута нахилу ($v_\lambda \rightarrow 0$) чи досягнення ненульової швидкості v_λ з метою зменшення λ , маємо обирати відповідні умови шліфування, тобто співвідношення q_k , ексцентриситет e_r , з використанням графіка залежності $v_\lambda = f(q_k, e_r)$ на рис. 4 як своєрідної номограми.

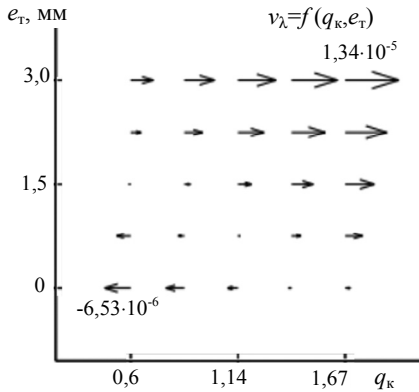


Рис. 4. Векторне поле змінювання v_λ залежно від геометричних показників обраної схеми шліфування.

У підсумку щодо отриманих результатів слід наголосити, що пріоритетом під час вибору тих чи інших геометричних параметрів досліджуваної схеми шліфування куль є отримання шліфованих куль із значеннями непостійності діаметра V_{DWS} в діапазоні 15–20 мкм, тобто варто вибирати співвідношення q_k на рівні 1,67, а ексцентриситет $e_r = 3$ мм. Однак за таких умов значення форм-фактору f_r (0,99425) й кута λ (–1,14756) будуть не найкращими з тих, які можна досягти. А значення швидкості v_λ сприятиме збільшенню кута нахилу λ , що змусить за деякий час змінити умови шліфування.

Отже, сприятливим для підвищення точності форми куль слід вважати перекриття c_r осі обертання круга зовнішньою окружністю розташування отворів у сепараторі, співвідношення q_k кількості куль на окружностях розташування отворів на рівні 1,67, а $e_r = 3$ мм за режиму обробки: частотою обертання шліфувального круга у $167,6 \text{ с}^{-1}$ ($n_k = 1600$ об/хв) і частотою обертання столу технологічного пристрою у $28,8 \text{ с}^{-1}$ ($n_z = 275$ об/хв) за дискретної подачі круга на врізання у 10^{-5} м кожні 5 хв (0,01 мм/5 хв).

ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження процесу алмазного шліфування керамічних куль з нітриду кремнію з їхнім базуванням на площині й круговою подачею з коливанням було встановлено закономірності уточнення форми куль й змінювання форми круга залежно від геометричних параметрів процесу. Показано, що означений вплив адекватно описують лінійні залежності обраних показників процесу від співвідношення кількості куль на окружностях їхнього розташування й несиметричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга за незмінного перекриття осі обертання круга зовнішньою окружністю розташування отворів у сепараторі.

Сприятливим для підвищення точності форми куль слід вважати перекриття осі обертання круга зовнішньою окружністю їхнього розташування, співвідношення кількості куль на окружностях на рівні 1,67 й несиметричного розташування поля траєкторій відносно осі обертання алмазного круга ($e_r = 3$ мм) за незмінного режиму обробки: частоти обертання шліфувального круга у $167,6 \text{ с}^{-1}$ і частоти кругової подачі куль у $28,8 \text{ с}^{-1}$ й дискретною подачею круга на врізання у 10^{-5} м кожні 5 хв.

ФІНАНСУВАННЯ

Дана робота не фінансувалася із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

S. V. Sokhan', V. V. Voznyy, V. H. Sorochenko,
O. A. Mykyshchenko
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Diamond grinding of ceramic balls for changing the geometric
parameters of the process

In article, for diamond grinding of ceramic balls made of silicon nitride which based on plane and feed according to the epicycloid, the results of an experimental study of the effect of the processing geometrical conditions 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 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 determined effect is described by adequate linear dependences of the process indicators of the ratio of the number of balls on the circumferences of the location of the holes in the separator of the device and the asymmetric location of the field of trajectories relative to the axis of rotation of the diamond wheel with the constant overlap of the axis of rotation of the circle with the outer the circumference of the holes in the separator. The value of the geometric indicators, for which the application of the investigated ball grinding scheme is appropriate, is given.

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

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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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>
7. Dowson D., Hamrock B.J. History of Ball Bearings. 1981. <https://core.ac.uk/download/pdf/42861682.pdf>
8. 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.
9. Pedroso M.P.G., Fortulan C.A. Model based design applied to ceramic balls grinding. *CIRP*. 2019. Vol. 81. P. 306–309.
10. Kang J., Hadfield M. A novel eccentric lapping machine for finishing advanced ceramic balls. *J. Eng. Manuf.* 2001. Vol. 215. P. 781–795.
11. 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.
12. 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
13. 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.
14. T.H.C. Childs, S. Mahmood, H.J. Yoon, Magnetic fluid grinding of ceramic balls. *Tribol. Int.* 1995. Vol. 28, no. 6. P. 341–348.
15. Jiang M., Komanduri R. On the finishing of Si3N4 balls for bearing applications. *Wear*. 1998. Vol. 215, iss. 1–2. P. 267–278.
16. Пасечный О.О. Алмазно-абразивная обработка деталей типа “шар” из конструкционной керамики. В кн.: Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. Т. 6. Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки. Киев, 2007. 340 с.
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. 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.

19. Sokhan' S.V., Voznyi V.V., Sorochenko V.G. Diamond grinding of ceramic balls in an annular groove. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 2. P. 143–153.
20. Сохань С.В., Возний В.В., Сороченко В.Г. Алмазне шліфування керамічних куль з базуванням на площині й круговою подачею з коливанням. *Надтверді матеріали*. 2025. № 1. Р. 8–16.
21. 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 04.01.24

Після доопрацювання 17.09.24

Прийнята до опублікування 30.09.24