

**С. В. Сохань*, В. В. Возний, А. С. Редькін,
В. Г. Сороченко, Є. М. Зубанєв, М. П. Гаманюк**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

*svsokh@gmail.com

Зношування алмазного круга при шліфуванні керамічних куль з карбіду кремнію

Представлено результати експериментального дослідження впливу режиму обробки на знос поверхні алмазного круга і точність партії куль для групового алмазного шліфування керамічних куль з карбіду кремнію. Схема шліфування і частота подачі круга мають статистично значимий вплив на збереження вихідної плоскої форми круга, а дискретна подача круга на врізання не має прямого впливу на нерівномірність зношування круга. Умовою максимально можливого зниження різномірності діаметра куль у партії за максимально можливого збереження вихідної плоскої форми круга є вибір схеми шліфування з траєкторією подачі куль, дотичною зсередини до зовнішнього краю круга, а також зниження до мінімуму з дослідженого діапазону дискретної подачі круга на врізання і одночасне підвищення до максимуму частоти подачі круга. Проте розкид варіації (непостійності) діаметра куль у партії за таких умов не досягає мінімально можливого значення.

Ключові слова: керамічні кулі з карбіду кремнію, групове алмазне шліфування, подача круга на врізання, частота подачі круга, різномірність діаметра куль у партії, розкид варіації діаметра куль у партії.

ВСТУП

На сучасному етапі виробництва авіаційних газотурбінних двигунів існує потреба у підвищених теплостійкості, надійності й терміну служби основних конструктивних елементів двигуна через проєктоване зростання температури робочого газу перед турбіною до 1850–2100 К. Настільки великі температурні впливи в окислювальному середовищі з одночасною дією знакозмінних силових навантажень призводять до того, що більшість загальноприйнятих і широко використовуваних в авіаційній техніці високоміцних легованих сплавів непрацездатні через значну деградацію їх фізико-механічних властивостей. За прогнозами спеціалістів, їх альтернативою є керамічні композиційні матеріали, перевага яких полягає у збереженні механічних властивостей за високих температур, високій зносо- і корозійній стійкості.

Так, в гібридних шарикопідшипниках використовуються переваги керамічних тіл кочення з високою якістю обробки поверхні сталевих кілець (рис. 1), що дозволяє забезпечити більш тривалий термін служби й кращі робочі характеристики при високих швидкостях обертання. Гарячепресований нітрид кремнію (Si_3N_4) є основним матеріалом при створенні керамічних підшипників кочення, хоча зберігається інтерес і до таких матеріалів, як оксид алюмінію (Al_2O_3), діоксид цирконію (ZrO_2) й карбіди кремнію (SiC) й бору (B_4C).

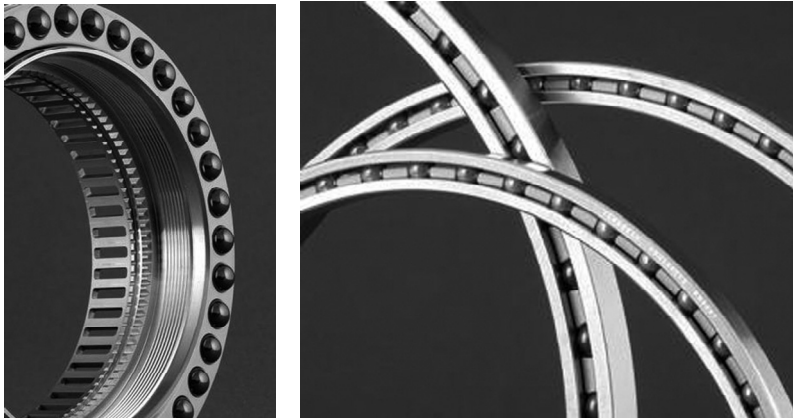


Рис. 1. Застосування керамічних куль у авіакосмічній галузі [1].

Експлуатаційні властивості підшипників залежать, насамперед, від стану їх робочих поверхонь, який визначається мікроструктурою матеріалів, точністю виготовлення поверхонь та їх шорсткістю. Найбільш складною при виготовленні підшипників кочення є технологія виготовлення керамічних куль. Вимоги до точності й якості виготовлення прецизійних керамічних куль великого діаметра ступеня точності G40 (діаметром до 50 мм) є наступними: відхилення від сферичної форми куль – $\leq 1,0$ мкм, варіація діаметра кулі – $\leq 1,0$ мкм, різномірність діаметра куль у партії – $\leq 2,0$ мкм, якості виготовлення за параметром шорсткості поверхні виробів $Ra \leq 0,06$ мкм [2]. Вказані вимоги забезпечуються групою алмазно-абразивною обробкою куль у кілька стадій.

Групова абразивна обробка куль між обертовими дисками є найбільш універсальною операцією виготовлення куль. Під час масового виробництва сталевих куль застосовують елеваторну обробку з постійним перемішуванням куль у бункері перед подачею на обробку у кілька доріжок кочення нижнього диска. Невеликі дослідні партії керамічних куль при алмазному шліфуванні або доведенні обробляють у одній доріжці кочення, а кількість одночасно оброблюваних куль обмежена можливістю їх розміщення на доріжці нижнього диска. Головний недолік такої технології – низька продуктивність обробки. Підґрунтям сучасних досліджень з удосконалення групової обробки керамічних куль стали роботи J. Kang і M. Hadfield [3, 4], N. Umehara та ін. [5], й останніми роками розвитком цього процесу займається широке коло дослідників [6–10].

Процес алмазного шліфування керамічних виробів, зокрема з карбіду кремнію, як і будь-якого крихкого неметалевого матеріалу, докорінно відрізняється від процесу алмазного шліфування металів [11–15]. Тут мають місце пружно-пластична деформація без руйнування, диспергування частинок матеріалу припуску при пластичній деформації і крихке руйнування матеріалу зі сколюванням частинок. Характерним результатом знімання припуску під час абразивної обробки є бічні відколи й відділення окремих фрагментів матеріалу з поверхневого шару, що проявляються у вигляді осередків руйнування, які найбільше впливають на формування шорсткості поверхневого шару. Імовірність появи тих або інших механізмів руйнування припуску визначається як фізико-механічними властивостями матеріалу, так і навантаженням на зерна абразиву (залежно від режимів обробки) [11, 15]. Порівнян-

ня схильності згаданих керамічних матеріалів до тріщиноутворення під час алмазно-абразивної обробки подано у [16].

Задачею алмазного шліфування керамічних куль є підготовка заготовок під наступне групове алмазне доведення. Вимогами до шліфування куль є, крім формоутворення сферичної поверхні кулі, забезпечення мінімально можливої різнорозмірності діаметра куль у партії і максимально можливої стабільності варіації діаметра кулі. Оскільки алмазне шліфування керамічних куль здійснюється з перекриттям торцевої робочої поверхні круга круговою подачею куль, схема такого перекриття і режим обробки впливають як на характер зношування круга, так і на показники точності керамічних куль, а закономірності такого впливу не досліджено.

Тому метою даної роботи було дослідження впливу схем алмазного шліфування з круговою подачею керамічних куль і режиму обробки на характер зношування круга і змінювання показників точності оброблюваних куль.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили під час алмазного шліфування заготовок керамічних куль з реакційно-спеченого карбіду кремнію на фрезерному верстаті мод. 6Т82 з встановленим на його робочому столі технологічним пристроєм для утримання куль між конусними поверхнями верхнього диска і притискного кільця [17]. За допомогою пристрою розділено кінематичні ланцюги, якими забезпечують здійснення власне формоутворювальних і переносних рухів від кінематичного ланцюга, яким забезпечують безпосередньо процес шліфування. Це дозволяє проводити обробку керамічних куль в діапазоні швидкостей шліфування 5–15 м/с і швидкостей переміщення куль 1,4–1,7 м/с [17].

Алмазний шліфувальний круг 6А2 300×75×3 (з розташуванням кільцевого алмазного шару на торці круга) містив алмази марки АС32 зернистістю 125/100 у відносній концентрації 100 з основою з металеві зв'язки М2-01. Кількість одночасно оброблюваних куль вихідним діаметром 41,2 мм складала 8 шт. (рис. 2, а). Швидкість обертання алмазного круга $n_k = 1000$ об/хв, стола з кулями $n_c = 180$ об/хв. Час проведення кожного дослідження – 90 або 120 хв залежно від режиму обробки.



Рис. 2. Розташування керамічних куль у пристрої (а), вимірювання координати профілю робочої поверхні круга (б).

Досліджено вплив схеми шліфування з круговою подачею куль на зношування алмазного круга і точність партії керамічних куль. Розглянуто схеми шліфування з круговою траєкторією, дотичною зсередини до зовнішнього краю робочої поверхні (рис. 3, а), з центром траєкторії посередині (рис. 3, б) і

з траєкторією, дотичною ззовні до внутрішнього краю робочої поверхні (рис. 3, в).

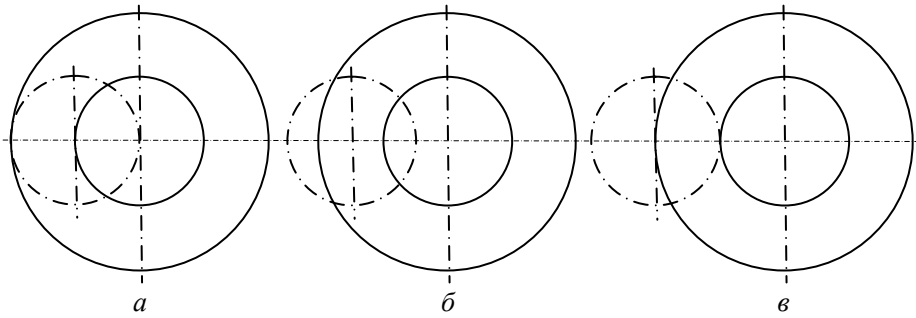


Рис. 3. Схеми шліфування з траєкторією подачі куль: дотичною зсередини до зовнішнього краю робочої поверхні (а), з центром посередині (б) і дотичною ззовні до внутрішнього краю робочої поверхні (в).

Окрім того досліджували вплив дискретної подачі круга на врізання s_B і частоти подачі круга f_K .

Показниками зношування алмазного круга були усереднена координата y_m профілю поверхні і швидкість зношування круга v_y (тобто швидкість змінювання y_m) як з часом, так і у радіальному напрямку круга.

Показниками точності партії керамічних куль були різномірність діаметра куль у партії V_{DwL} і відносний розкид варіації (непостійності) діаметра куль у партії V_{Dws} (позначення згідно ISO 3290-2:2014).

Вказані показники обраховували після безпосереднього вимірювання або поточної координати y_i профілю поверхні круга і розрахунку усередненої координати y_m , або діаметра кожної кулі і варіації цього діаметра як до, так і після обробки.

Вимірювання поточної координати y_i профілю поверхні круга проводили безпосередньо на верстаті за допомогою багатообертового індикатора часового типу ИЧ-10 по ГОСТ 577–68 з ціною поділки шкали вимірювань 0,01 мм, закріпленого на штативі, як показано на рис. 2, б. Перед вимірюванням калібрували початок відліку за однією й тією ж точкою на торцевій поверхні кріплення круга. Координату y_i вимірювали у радіальному напрямку у п'яти рівновіддалених одна від одної точках, з яких перша і остання точки знаходилися за 3,5 мм відповідно від внутрішнього і зовнішнього країв алмазного шару. Вимірювання повторювали для інших двох радіальних напрямків, рівновіддалених від першого напрямку і один від одного, причому вихідний напрямок вибирали довільно і вже не змінювали його по ходу виконання кожного дослідження. На основі вимірювань обраховували усереднену координату y_m для кожного з реперних значень радіуса круга.

Вимірювання діаметра кулі проводили на довгомірі вертикального типу ИЗВ-2 з ціною поділки шкали вимірювань 1 мкм. Діаметр кулі вимірювали у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, причому вихідний напрямок вибирали довільно. На основі вимірювань обраховували середній діаметр кожної кулі D_{wm} (позначення згідно ISO 3290-2:2014) до й після обробки. Значення різномірності діаметра куль у партії V_{DwL} визначали згідно стандарту як різницю між середніми діаметрами найбільшої й найменшої куль у партії.

Вимірювання варіації діаметра i -тої кулі $V_{D_{wsi}}$ як різницю між найбільшим і найменшим одиничними діаметрами кулі (згідно стандарту) проводили також на довгомірі вертикального типу ИЗВ-2 з ціною поділки шкали вимірювань 1 мкм. Кулю, що вимірювали, було розташовано в призмі на дві опорні точки, що забезпечувало її центрування навпроти щупу довгоміра в одній вертикальній площині, й подавали уздовж направляючих призми до упору у додатковий горизонтальний установчий упор, що призводило до її центрування навпроти щупу – в площині, яка є перпендикулярною першій. Під час повороту кулі у призмі у довільно вибраному напрямку з періодичною зміною цього напрямку фіксували діапазон відхилень покажчика приладів. Різницю між максимальним і мінімальним показаннями довгоміра вважали за варіацію діаметра кулі $V_{D_{ws}}$.

Вимірювання виконували до і після сеансу шліфування, щоб зафіксувати зміну досліджуваних показників у часі.

Оскільки від самого початку круг мав робочу поверхню, зношену за формою на увігнутий конус, послідовність здійснення експерименту була наступною: спочатку досліджували схему шліфування з траєкторією подачі, дотичною зсередини до зовнішнього краю робочої поверхні круга, потім з центром траєкторії посередині і насамкінець траєкторією подачі, дотичною ззовні до внутрішнього краю.

Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [13], під час обрахунку середніх значень показників, що вимірювали, – діаметра і відхилення від сферичної форми куль, останні перевіряли на наявність результатів, що різко виділяються серед інших. Якщо перевірка дисперсій вибірок за критерієм Кохрена показувала (з довірчою імовірністю 0,95), що вони є однорідними, за найкращу оцінку дисперсії відтворюваності вважали середньозважену дисперсію

$$S_{\text{відтв}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{відтв}i}^2.$$

Оскільки вихідні змінні процесу шліфування є розрахунковими величинами, які базуються кожного разу на вимірюванні вказаних у методиці геометричних показників, дисперсію відтворюваності для них у кожному досліді обраховували як усереднену дисперсію вибірок у поточному досліді, приведену до розмірності розрахункової величини (тобто мкм/год):

$$S_{\text{відтв}i}^2 = \frac{1}{km} \sum_{i=1}^m S_i^2,$$

де $k = 10^6$ для дисперсії відтворюваності у кожному досліді.

Далі за обрахованими значеннями y_m , v_y , $V_{D_{wL}}$ і відносного розкиду Δ_{VD} варіації діаметра $V_{D_{ws}}$ кулі (вихідними й після проведення дослідів) було побудовано графіки змінювання цих характеристик з часом проведення дослідів у вигляді сукупності експериментальних точок і апроксимаційних моделей змінювання у часі або по радіуса поверхні круга.

На другому етапі досліджень виявили кращу серед досліджуваних схем шліфування з позиції збереження вихідної плоскої форми алмазного круга, а саме: схему шліфування з траєкторією подачі куль, дотичною зсередини до зовнішнього краю круга. Далі за допомогою повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^2 [18] визначили коефіцієнти впливу режиму обробки: дискретної подачі круга на врізання s_b і частоти подачі круга f_k , на показник нерівномірності швидкості зношування круга по радіуса – коефіцієнт лінійної регресії $k_{\text{л}}$. План експерименту передбачав варіювання факторами на наступ-

них двох рівнях: дискретна подача круга на врізання s_b дорівнювала 20 і 30 мкм, частота подачі круга $f_k = 4$ і 6 год^{-1} .

На третьому етапі досліджень за допомогою ПФЕ типу 2^3 [18] визначили коефіцієнти впливу нерівномірності зношування круга, факторів режиму обробки на точність партії керамічних куль. План експерименту передбачав варіювання факторами на наступних двох рівнях: коефіцієнт лінійної регресії k_n , швидкості зношування круга по радіусу – 0,008 (схема шліфування з траєкторією подачі, дотичною зсередини до зовнішнього краю) і 0,0171 (схема шліфування з центром траєкторії подачі посередині ширини робочої поверхні круга), фактори режиму обробки – на зазначених рівнях.

За отриманими результатами дослідів побудували лінійні моделі досліджуваних показників процесу від факторів, що варіюються, з урахуванням взаємодії факторів.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті досліджень процесу шліфування керамічних куль, проведених протягом 7 год з використанням кожної зі схем обробки – послідовно з траєкторією подачі куль, дотичною зсередини до зовнішнього краю, з центром посередині ширини робочої поверхні круга і дотичною ззовні до внутрішнього краю, отримано закономірності змінювання усереднених координат y_{mi} профілю робочої поверхні круга, які мають тенденцію до монотонного спадання протягом усього часу проведення дослідів. Останні представлені у вигляді сукупності експериментальних точок для реперних значень радіуса r і апроксимовано функцією квадратичної регресії (рис. 4, а). Серед досліджених функцій регресії: лінійної, квадратичної, кубічної, степеневі, логарифмічної, показникової, експонентної, вона показала максимальний коефіцієнт кореляції і мінімальну середню похибку апроксимації (відповідно $R = 0,82$ і $\bar{A} = 2\%$). Коефіцієнт кореляції розраховували за формулою

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}}, \text{ де } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i, \text{ а середню похибку апроксимації – за}$$

$$\text{формулою } \bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% \text{ [13].}$$

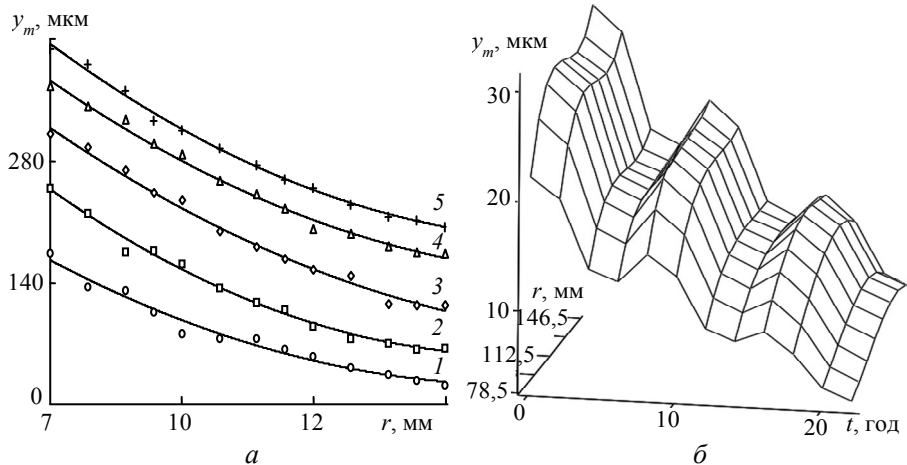


Рис. 4. Зміна з часом усереднених експериментальних (а) і поточних розрахункових (б) координат y_{mi} профілю поверхні круга для реперних значень радіуса $r = 78,5$ (1), $95,5$ (2), $112,5$ (3), $129,5$ (4), $146,5$ (5) мм.

При визначенні деяких розрахункових показників (наприклад, поточних розрахункових координат профілю поверхні круга або швидкості змінювання показника) для уникнення похибки через розкид значень цього показника щодо значень апроксимаційних моделей у реперних точках, тут і далі під час побудови графіків швидкостей змінювання показників застосували однаковий підхід – спиралися на зазначені моделі. На такому підґрунті отримано закономірності змінювання поточних розрахункових координат профілю поверхні круга (див. рис. 4, б).

Еволюцію змінювання форми робочої поверхні круга протягом усього часу досліджень подано на рис. 5 також у вигляді сукупності експериментальних точок усередненої координати y_m профілю поверхні – вихідної і після застосування кожної з досліджених схем перекриття. Зазначені закономірності апроксимовано функціями кубічної регресії ($R = 0,97-0,99$, $\bar{A} = 9,2-20,3\%$).

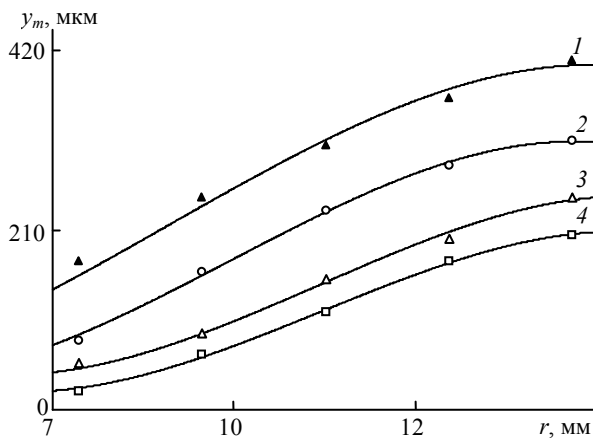


Рис. 5. Зміна у радіальному напрямку усередненої координати y_m профілю поверхні круга: до проведення дослідів (1), з траєкторією подачі, дотичною зсередини до зовнішнього краю (2), з центром посередині ширини круга (3), з траєкторією, дотичною зовні до внутрішнього краю (4).

На підґрунті апроксимаційних моделей отримано закономірності змінювання швидкості лінійного і об'ємного зношування поверхні круга v_y , як у часі, так і у радіальному напрямку (рис. 6).

Відмінності у тенденції змінювання швидкості лінійного зношування круга за досліджених схем перекриття видно на рис. 7. Експериментальні точки було розраховано як середнє значення швидкості за 7 год дослідів з відповідною схемою шліфування, а представлені закономірності апроксимовано функціями кубічної регресії ($R = 0,99$, $\bar{A} = 0,3-3,8\%$). Наведені на рис. 7 пунктирні лінії функцій лінійної регресії $y_1 = 0,0147x + 11,3227$, $y_2 = 0,0171x + 7,4443$ і $y_3 = 0,0261x + 2,7074$, було отримано за даними зношування алмазного шару круга для реперних значень радіуса r в межах 95,5–146,5 мм.

Аналогічним чином було отримано функції лінійної регресії до кривих змінювання швидкості лінійного зношування круга при варіюванні факторами схеми шліфування і режиму обробки (табл. 1). Коефіцієнти лінійної регресії слугували у подальшому дослідженні кількісними індикаторами для визначення коефіцієнтів впливу зазначених факторів на розподіл швидкості лінійного зношування круга.

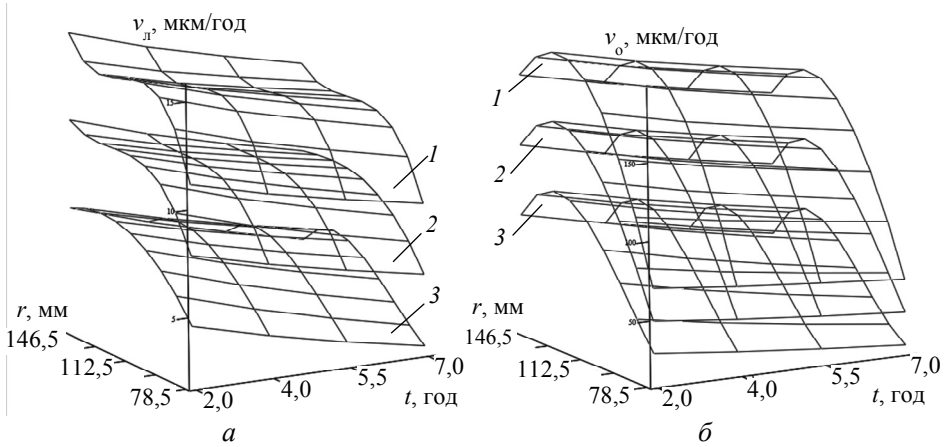


Рис. 6. Зміна з часом і по радіусу круга швидкості лінійного (а) і об'ємного (б) зношування круга з траєкторією подачі, дотичною зсередини до зовнішнього краю (1), з центром посередині ширини круга (2), з траєкторією, дотичною ззовні до внутрішнього краю (3).

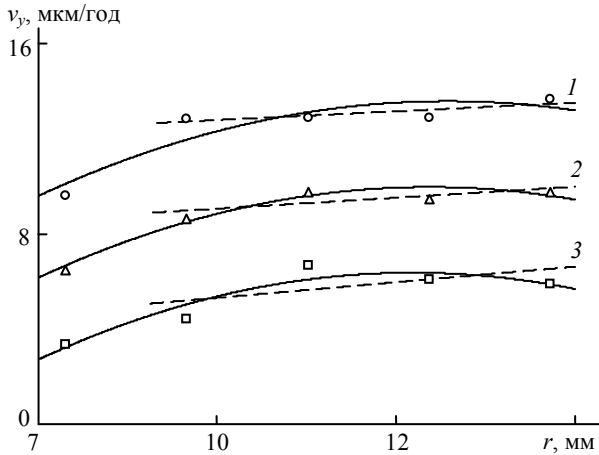


Рис. 7. Зміна швидкості лінійного зношування v_y , усередненої за 7 год, за радіусом робочої поверхні круга: з траєкторією подачі, дотичною зсередини до зовнішнього краю (1), з центром посередині ширини круга (2), з траєкторією, дотичною ззовні до внутрішнього краю (3).

Таблиця 1. Функції лінійної регресії, які вказують на загальну тенденцію змінювання швидкості лінійного зношування круга у радіальному напрямку

Режим обробки	Схема шліфування		
	дотик траєкторії подачі зовнішнього краю круга зсередини	з центром траєкторії подачі посередині ширини круга	дотик траєкторії подачі внутрішнього краю круга ззовні
$s_B = 20 \text{ мкм}, f_k = 4 \text{ год}^{-1}$	$y_1 = 0,0136x + 13,0504$	$y_1 = 0,0174x + 8,8653$	$y_1 = 0,0212x + 4,6731$
$s_B = 30 \text{ мкм}, f_k = 4 \text{ год}^{-1}$	$y_2 = 0,0147x + 11,8534$	$y_2 = 0,0152x + 8,1936$	$y_2 = 0,0222x + 3,4771$
$s_B = 20 \text{ мкм}, f_k = 6 \text{ год}^{-1}$	$y_3 = 0,0157x + 10,8605$	$y_3 = 0,0195x + 6,6494$	$y_3 = 0,0233x + 2,4424$
$s_B = 30 \text{ мкм}, f_k = 6 \text{ год}^{-1}$	$y_4 = 0,0165x + 9,9574$	$y_4 = 0,0203x + 5,7505$	$y_4 = 0,0241x + 1,5393$

Зміна з часом усередненого знятого припуску Z_L і швидкості зняття припуску v_Z , а також досягнутих показників точності партії керамічних куль, а саме: різномірності діаметра куль у партії V_{DwL} і відносного розкиду Δ_{VD} з часом шліфування, наведено на рис. 8–10.

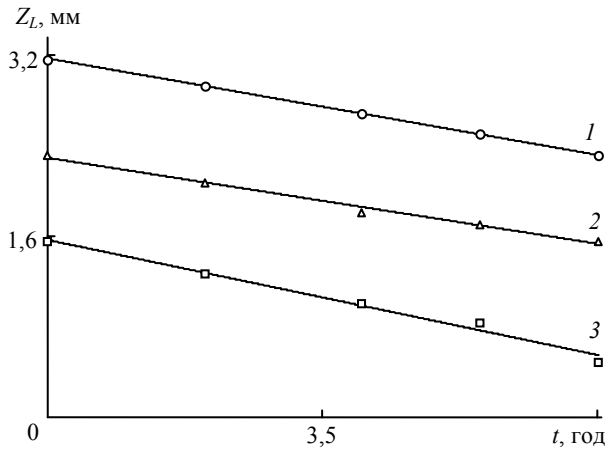


Рис. 8. Зміна з часом усередненого знятого припуску з траєкторією подачі, дотичною зсередини до зовнішнього краю (1), з центром посередині ширини круга (2), з траєкторією, дотичною ззовні до внутрішнього краю (3).

Експериментальні точки на рис. 8 розраховано як середнє значення знятого припуску у партії керамічних куль, а представлені закономірності для кожної з досліджених схем перекриття апроксимовано відповідними функціями лінійної регресії $y_1 = -0,1215x + 3,1581$; $y_2 = -0,1082x + 2,2837$ і $y_3 = -0,1450x + 1,5609$.

Точки на рис. 9 відображають розрахункові значення швидкості зняття припуску, а представлені закономірності для кожної з досліджених схем перекриття апроксимовано відповідними функціями: $y_1 = 0,122$; $y_2 = 0,108$ і $y_3 = 0,145$.

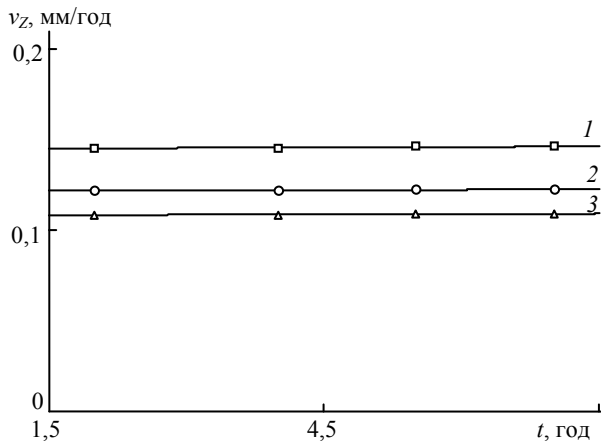


Рис. 9. Зміна з часом швидкості зняття припуску: з траєкторією подачі, дотичною зсередини до зовнішнього краю (1), з центром посередині ширини круга (2), з траєкторією, дотичною ззовні до внутрішнього краю (3).

За даними експериментальних досліджень і виконаних розрахунків визначили коефіцієнт шліфування ($\text{мм}^3/\text{мм}^3$), для чого об'ємну продуктивність процесу шліфування визначили як об'єм оболонки сферичної форми з товщиною стінки, рівною швидкості зняття припуску з керамічної кулі, а швидкість об'ємного зношування круга з урахуванням конусної форми поверхні робочого шару – як об'єм усіченого конуса висотою, рівною усередненій по профілю поверхні круга швидкості зношування алмазного шару. Оскільки остання не є постійною, результати розрахунків у табл. 2 подано для екстремальних значень коефіцієнта шліфування.

Таблиця 2. Коефіцієнт шліфування за досліджених схем групового алмазного шліфування керамічних куль

Показник продуктивності процесу	Схема шліфування з круговою подачею куль		
	дотик траєкторії зовнішнього краю круга зсередини	з центром траєкторії посередині ширини круга	дотик траєкторії внутрішнього краю круга ззовні
Коефіцієнт шліфування, $\text{мм}^3/\text{мм}^3$	3,3–4,0	3,9–5,2	7,9–12,9
Відносний знос алмазного круга, $\text{мм}^3/\text{мм}^3$	0,25–0,30	0,19–0,26	0,08–0,13

На другому етапі дослідження визначили коефіцієнти впливу схеми шліфування і режиму обробки (дискретної подачі круга на врізання s_b і частоти подачі круга f_k) на показники зношування круга: нерівномірності швидкості зношування круга по радіусу – коефіцієнт лінійної регресії k_L і швидкість об'ємного зношування круга v_o , а також на показники точності партії куль: різномірність діаметра куль у партії V_{DwL} і відносний розкид Δ_{VD} . За верхній і нижній рівні варіювання схемою шліфування було прийнято схему з траєкторією подачі, дотичною до зовнішнього краю і схему з центром траєкторії посередині ширини круга відповідно. Матриця змінювання факторів у абсолютних величинах і значення досліджуваних показників процесу наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Матриця змінювання факторів у абсолютних величинах і значення досліджуваних показників процесу на другому етапі дослідження

Дослід	Схема шліфування*	s_b , мкм	f_k , год ⁻¹	k_L	v_o , мкм ³ /год	V_{DwL} , мм	Δ_{VD} , %
1	зовнішній край	20	4	0,0136	756,0	0,012	40
2	посередині	20	4	0,0212	370,2	0,030	5
3	зовнішній край	30	4	0,0147	700,9	0,028	62
4	посередині	30	4	0,0222	315,1	0,009	20
5	зовнішній край	20	6	0,0157	655,9	0,009	23
6	посередині	20	6	0,0233	268,2	0,008	21
7	зовнішній край	30	6	0,0165	614,4	0,024	23
8	посередині	30	6	0,0241	226,7	0,018	32

*Зовнішній край – схема шліфування з траєкторією подачі, дотичною до зовнішнього краю круга зсередини, посередині – з центром траєкторії подачі посередині ширини круга.

Статистичну значимість коефіцієнтів рівняння регресії перевіряли за критерієм Стюдента. Результати перевірки адекватності отриманих рівнянь регресії результатам експериментів за критерієм Фішера наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Перевірка адекватності рівнянь регресії результатам дослідів

Показник	k_n	V_o	V_{DwL}	Δ_{VD}
Дисперсія відтворюваності $S_{\text{відтв}}^2$	$4,77 \cdot 10^{-6}$	12142,8	$7,76 \cdot 10^{-5}$	245,97
Дисперсія адекватності $S_{\text{ад}}^2$	$6,64 \cdot 10^{-6}$	11658,4	$8,17 \cdot 10^{-6}$	211,63
Розрахований F -критерій Фішера $f = S_{\text{ад}}^2 / S_{\text{відтв}}^2$	1,393	0,960	0,105	0,860
Табличний F -критерій Фішера для $p = 0,05$ і чисел ступенів свободи $f_{\text{ад}} = (N - 1)$, $f_{\text{відтв}} = N(m - 1)$	2,266	2,266	2,772	2,382
	$(f_{\text{ад}} = 6, f_{\text{відтв}} = 56)$	$(f_{\text{ад}} = 6, f_{\text{відтв}} = 56)$	$(f_{\text{ад}} = 3, f_{\text{відтв}} = 56)$	$(f_{\text{ад}} = 5, f_{\text{відтв}} = 56)$

Отримані моделі мають наступний вигляд:

$$k_n = 0,01661 + 0,00149x_1 + 0,00139x_3;$$

$$v_o = 585,1 - 96,7x_1 - 46,9x_3;$$

$$V_{DwL} = 0,0172 + 0,0026x_2 - 0,0026x_3 - 0,0054x_1x_2 + 0,0038x_2x_3 + 0,0043x_1x_2x_3;$$

$$\Delta_{VD} = 28,21 - 8,50x_1 + 6,00x_2 + 10,51x_1x_3$$

або

$$k_n = 0,01661 \pm 0,00149 \cdot 1 + 0,00028f_k;$$

$$v_o = 585,1 \mp 96,7 \cdot 1 - 9,4f_k;$$

$$V_{DwL} = 0,0172 + 0,0026s_B - 0,0026f_k \mp 0,0054s_B + 0,0038s_B f_k \pm 0,0043s_B f_k;$$

$$\Delta_{VD} = 28,21 \mp 8,50 \cdot 1 + 6,00s_B \pm 10,51f_k.$$

Поверхні відгуку показників точності партії куль на змінювання факторів, які варіювалися, подано на рис. 10.

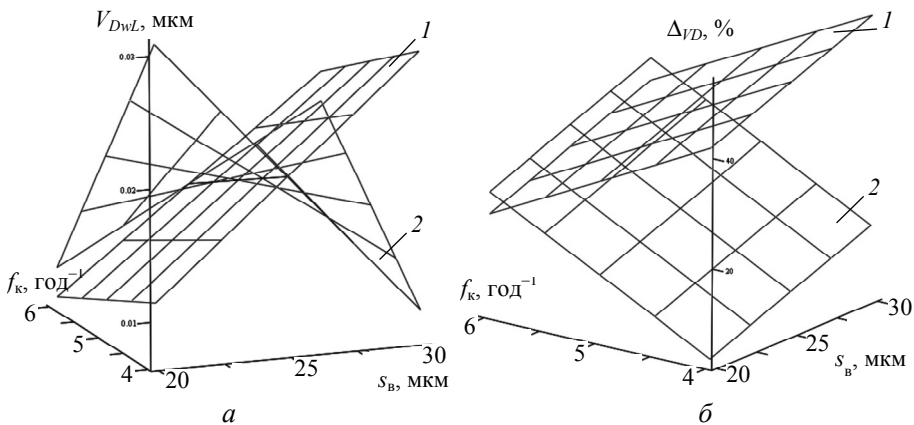


Рис. 10. Поверхні відгуку на змінювання факторів: різномірності діаметра куль у партії V_{DwL} (а) і відносного розкиду Δ_{VD} (б), $k_n = 0,008$ (1), $0,0171$ (2).

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Зношування поверхні алмазного круга під час групового алмазного шліфування керамічних куль здійснюється зі змінною як у часі так і у радіальному напрямку швидкістю, яка залежить від схеми шліфування і режиму обробки (див. рис. 4–6, табл. 2). На коефіцієнт лінійної регресії k_L швидкості зношування і відносний знос круга статистично значимий вплив мають схема шліфування і частота подачі круга f_k .

З наведених на рис. 7 і у табл. 1 даних витікає, що збереження вихідної плоскої форми алмазного круга забезпечує схема шліфування з траєкторією подачі куль, дотичною зсередини до зовнішнього краю круга – про це свідчить мінімальний серед інших коефіцієнт лінійної регресії k_L швидкості зношування круга по радіуса. Перевагою цієї схеми є також вища за інші абсолютна продуктивність шліфування. Однак за такої схеми має місце вища за інші швидкість зношування алмазного круга (див. рис. 6), найбільший з отриманих відносний знос алмазного круга (див. табл. 2) й посередня швидкість зняття припуску (див. рис. 9).

Оскільки стратегічною метою процесу алмазного шліфування керамічних куль є в першу чергу максимально можливе виправлення різнорозмірності діаметра куль у партії й розкиду варіації діаметра куль у партії за максимально можливого збереження вихідної плоскої форми алмазного круга і лише в другу чергу досягнення прийнятної продуктивності процесу, саме враховуючи це слід визначати позитивну тенденцію у комплексному впливі зношування алмазного круга, схеми шліфування і режиму обробки.

Загалом, як видно з розрахованих статистичних моделей, прямий вплив схеми шліфування на різнорозмірність діаметра V_{DwL} куль у партії відсутній, а мінімальні значення V_{DwL} досягнуті у дослідах за схеми шліфування з траєкторією подачі куль, дотичною зсередини до зовнішнього краю круга і за певного режиму обробки: $s_B \rightarrow s_{B_{\min}}$ і $f_k \rightarrow f_{k_{\max}}$ (див. рис. 10, а). За таких умов шліфування і відносний розкид $\Delta_{VD} \rightarrow \Delta_{VD_{\min}}$, але у межах не нижче за ті, які досягаються за схеми шліфування з $k_L = 0,008$ (див. рис. 10, б). Слід взяти до уваги також краще збереження форми алмазного круга за такої схеми шліфування у порівнянні з іншими схемами.

Щодо впливу досліджуваних факторів на Δ_{VD} слід зазначити приблизно однаковий прямий вплив на нього схеми шліфування, дискретної подачі круга на врізання s_B і частоти подачі круга f_k . Мінімальні значення Δ_{VD} досягнуті у дослідах за схеми шліфування з центром траєкторії подачі куль посередині ширини круга (див. рис. 10, б) і за певного режиму обробки: $s_B \downarrow \rightarrow s_{B_{\min}}$ і $f_k \downarrow \rightarrow f_{k_{\min}}$, однак за таких умов спостерігається найбільша V_{DwL} і гірше зберігається вихідна форма алмазного круга. Швидкість зношування алмазного круга знаходиться на середньому рівні.

Отже завдання ефективної підготовки керамічних куль під наступне алмазне доведення вирішується вибором схеми групового алмазного шліфування з траєкторією подачі куль, дотичною зсередини до зовнішнього краю круга, $s_B \rightarrow s_{B_{\min}}$ і $f_k \rightarrow f_{k_{\max}}$. За таких умов має місце максимально можливе виправлення різнорозмірності діаметра куль у партії за максимально можливого збереження вихідної плоскої форми алмазного круга й посереднє значення розкиду варіації діаметра куль у партії.

ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження впливу схеми групового алмазного шліфування керамічних куль й режиму обробки на зношування

поверхні алмазного круга й точність партії керамічних куль з карбіду кремнію встановлено, що на збереження вихідної плоскої форми алмазного круга статистично значимий вплив мають схема шліфування і частота подачі круга, а дискретна подача круга на врзання не має прямого впливу на нерівномірність зношування круга.

Умовою максимально можливого виправлення різнорозмірності діаметра куль у партії з одночасним максимально можливим збереженням вихідної плоскої форми алмазного круга є вибір схеми групового алмазного шліфування з траєкторією подачі куль, дотичною зсередини до зовнішнього краю круга, зниження до мінімуму з досліджених значень дискретної подачі круга на врзання і одночасне підвищення до максимуму частоти подачі круга. Однак розкид варіації діаметра куль у партії за таких умов не досягає мінімально можливого значення.

S. V. Sokhan', V. V. Voznyy, A. S. Redkin, V. H. Sorochenko,
E. M. Zubaniev, M. P. Hamaniuk
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Wear of a diamond wheel during grinding of ceramic balls
from silicon carbide

The results of an experimental investigation of the treatment mode influence on the wear of the diamond wheel surface and the accuracy of the ball lot for group diamond grinding of ceramic balls of silicon carbide are presented. The grinding pattern and the wheel feed frequency have a statistically significant effect on the keeping of original flat shape of the wheel, at the same time, direct effect of the discrete depth feed of the wheel is missing on the uneven wear of the wheel. Minimizing the difference in the diameter of the balls in the lot and maintaining the original flat shape of the will be in condition of the choice of grinding pattern with the trajectory of the balls tangent to the outer edge of the wheel, as well as minimizing of discrete depth feed of the wheel in the investigated range and growth up to maximum wheel feed frequency. However, the deviation of the variation in ball diameter within the lot under these conditions does not reach the minimum possible value.

Keywords: ceramic balls from silicon carbide, group diamond grinding, depth feed of the wheel, frequency of wheel feed, variation of ball lot diameter, deviation of the variation in ball diameter within the lot.

1. CEROBEAR Aerospace Bearings. <https://cerobear.com/download/cerobear-aerospace-bearings/>
2. ISO 3290-2:2014. <https://www.iso.org/ru/standard/60133.html>.
3. Kang J., Hadfield M. Parameter optimization by Taguchi Methods for finishing advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine. *Proc. Ins. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manufact.* 2001. 215, no. 1. P. 69–78.
4. 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.
5. Umehara N., Kirtane T., Gerlick R., Jain V.K., Komanduri R. A new apparatus for finishing large size/large batch silicon nitride (Si_3N_4) balls for hybrid bearing applications by magnetic float polishing (MFP). *Int. J. Machine Tools Manufact.* 2006. Vol. 46, no. 2. P. 151–169.
6. Lv C.C., Sun Y.L., Zuo D.W. A novel eccentric lapping method with two rotatable lapping plates for finishing cemented carbide balls. *Int. J. Mechanical Mechatr. Eng.* 2015. Vol. 9, no. 5. P. 684–691.
7. 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.
8. 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.

9. Pedroso M.P.G., Fortulan C.A. Model biased design applied to ceramic balls grinding. *CIRP*. 2019. Vol. 81. P. 306–309.
10. Xiao-lan Xiao, Guang-xian Li, Hai-juan Mei, Qiu-sheng Yan, Hua-tay Lin, Feng-lin Zhang. Polishing of silicon nitride ceramic balls by clustered magnetorheological finish micromachines. *Micromachines (Basel)*. 2020. Vol. 11, no. 3. P. 304.
11. Гусев В.В., Калафатова Л.П. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики: монография. Донецк: ГБУЗ “ДонНТУ”, 2012. 250 с.
12. Филатов Ю.Д., Ветров А.Г., Сидорко В.И., Филатов А.Ю., Ковалев С.В. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния. *Сверхтв. материалы*. 2013. № 5. С. 63–71.
13. Chen Jiang, Jinyi Cheng, Tao Wu. Theoretical model of brittle material removal fraction related to surface roughness and subsurface damage depth of optical glass during precision grinding. *Precision Eng.* 2017. Vol. 49. P. 421–427.
14. Филатов Ю.Д., Ветров А.Г., Сидорко В.И., Филатов А.Ю., Ковалев С.В., Курилович В.Д., Данильченко М.А., Прихна Т.А., Боримский А.И., Куцай А.М., Полторацкий В.Г. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния. *Сверхтв. материалы*. 2015. № 1. С. 63–71.
15. Филатов А.Ю., Сидорко В.И., Ковалев С.В., Филатов Ю.Д., Ветров А.Г. Производительность полирования анизотропных монокристаллических материалов для оптоэлектроники. *Сверхтв. материалы*. 2016. № 2. С. 65–76.
16. Sokhan' S.V., Maistrenko A.L., Sorochenko V.G., Voznyi V.V., Kulych V.G., Gamanyuk M.P., Zubanev E.M. The influence of machining conditions on performance of diamond grinding of silicon carbide ceramic balls. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 6. P. 402–413.
17. 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.
18. 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 10.07.20

Після доопрацювання 10.07.20

Прийнята до опублікування 24.07.20