

**С. В. Сохань*, А. Л. Майстренко, В. Г. Сороченко,
В. В. Возний, В. Г. Кулич, М. П. Гаманюк, Є. М. Зубанев**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*svsokh@gmail.com

Вплив режиму обробки на показники алмазного шліфування керамічних куль з карбіду кремнію

Представлено результати експериментального дослідження впливу режиму обробки на процес алмазного шліфування керамічних куль з карбіду кремнію, показниками якого є швидкість зменшення діаметра куль, швидкість змінювання (зменшення/збільшення) відхилення від сферичної форми і швидкість змінювання різномірності діаметра куль у партії. Для виокремлення частки, обумовленої власне впливом режиму обробки, застосовано метод графічної апроксимації змінювання у часі середніх значень показників точності куль у партії. Встановлено, що виокремлені частки можуть змінюватися як у бік зростання, так і зниження в залежності від значень параметрів режиму обробки, як-от: подачі алмазного круга на врізання, частоти подачі круга і швидкості обертання стола з кулями. В результаті проведення повних факторних експериментів типу 2^3 визначено найбільш ефективно для виправлення форми куль поєднання досліджуваних факторів, яке є різним для трьох діапазонів змінювання цього відхилення, а саме: вище за 300 мкм, в межах 150–300 мкм, нижче за 150 мкм.

Ключові слова: керамічні кулі з карбіду кремнію, алмазне шліфування, подача алмазного круга на врізання, частота подачі круга, швидкість обертання стола з кулями, діаметр і відхилення від сферичної форми куль, різномірність діаметра куль у партії.

ВСТУП

У багатьох галузях промисловості експлуатуються в значній кількості підшипники кочення, насоси, гідродвигуни й інші пристрої і механізми, ресурс і надійність роботи яких в основному визначаються працездатністю і якістю виготовлення деталей типу “куля”. Кулі на даний час виготовляються переважно зі сталі й вони відносно швидко відмовляють в умовах високих навантажень, температур, а також інтенсивного абразивного, корозійного, хімічного й іншого видів зношування. Заміна сталевих куль на керамічні в багатьох випадках дозволяє досягти більш високих експлуатаційних показників і розширити область функціональних можливостей пристроїв, у яких вони застосовуються. 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 ство-

ренні керамічних підшипників кочення, хоча зберігається інтерес й до таких матеріалів, як оксид алюмінію (Al_2O_3), діоксид цирконію (ZrO_2) й карбіди кремнію (SiC) й бору (B_4C).

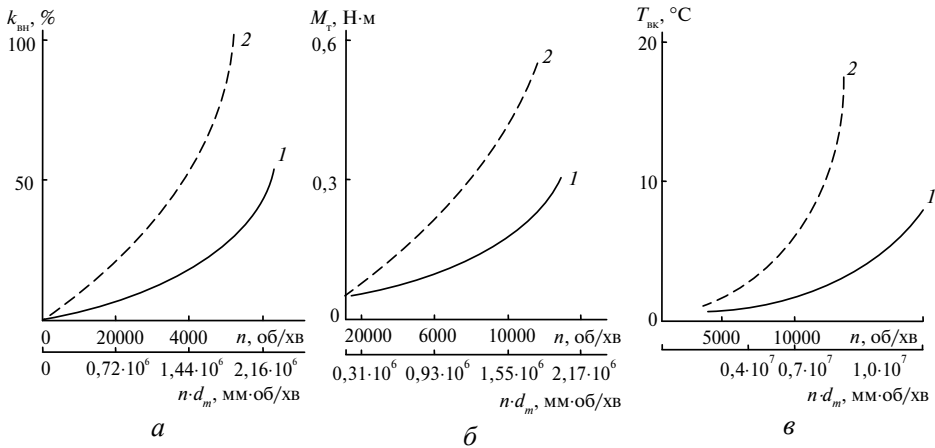


Рис. 1. Порівняння характеристик гібридного (1) й сталевого (2) шарикопідшипників [1]: коефіцієнт відцентрового навантаження (а), момент тертя (б), зростання температури на зовнішньому кільці (в).

Ряд фірм США, Європи, Японії, КНР і Росії вже сьогодні випускають та експлуатують керамічні або гібридні підшипники кочення. Найбільш відомі закордонні фірми, які спеціалізуються на виробництві керамічних куль і керамічних або гібридних підшипників – це зокрема “SKF USA, Inc.” (бренд SKF), “Boca Bearing Company” (BOCA BEARING), “Ortech Advanced Ceramics” (OAC), “ZEN Group, Inc.” (ZEN) зі США; “SMB Bearings” (SMB) з Великої Британії; “NSK Europe, Ltd.” (NSK), GMN GMBH (GMN) з Німеччини; “Ceratec Ceramic Bearings BV” (CERATEC) з Нідерландів; низка компаній з КНР.

В 1990-х роках у провідних науково-дослідних організаціях НАН України створено ефективні керамічні й композиційні матеріали, як-от на основі карбідів бору й кремнію, а також технологій виготовлення з них прецизійних виробів типу “куля” [2, 3], які працюють у важких умовах експлуатації. Насамперед, це стосується матеріалів на основі карбіду бору – третього за твердістю матеріалу після алмазу й кубічного нітриду бору, і такого, що відноситься до одного з самих інертних хімічних з’єднань, має високу твердість, міцність і унікальну зносостійкість в умовах впливу агресивних середовищ й абразивного зношування.

Важливим стимулом для удосконалення сучасної технічної кераміки є прагнення розробити газотурбінний двигун з високим коефіцієнтом корисної дії для авіаційно-космічної галузі. Умови роботи підшипників основного валу таких двигунів – частота обертання вала більше 30 000 об/хв і температура вище за 650 °C. При температурі газу понад 1100 °C використовуються тільки керамічні матеріали з більшою температурною стійкістю в порівнянні з підшипниковими сталями або навіть кобальтовими сплавами й інструментальними сталями з високим змістом вольфраму.

Найбільш складним при виготовленні підшипників кочення є технологічний процес виготовлення куль (рис. 2). Експлуатаційні властивості підшипників залежать, насамперед, від стану їхніх робочих поверхонь, який визна-

часться точністю виготовлення, шорсткістю й мікроструктурою. Вимоги до точності й якості виготовлення прецизійних керамічних куль великого діаметра надзвичайно високі – згідно стандарту ISO 3290-2:2014 для керамічних куль ступеня точності G40 (діаметром до 50 мм) 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 [4]. Вказані вимоги забезпечуються алмазно-абразивною груповою обробкою у кілька стадій. Головний недолік існуючих технологій – низька продуктивність обробки керамічних куль.



Рис. 2. Керамічні заготовки після спікання (а) й готові кулі (б).

Групово абразивна обробка куль між обертовими дисками є найбільш універсальною операцією виготовлення куль і по цей час привертає увагу дослідників [5–7]. 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. Керамічні ж кулі при шліфуванні або доведенні перекочуються уздовж доріжок кочення без їх перемішування у бункері. При цьому кількість одночасно оброблюваних куль обмежена можливістю їх розміщення на доріжках нижнього диска.

ОСОБЛИВОСТІ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Процес алмазного шліфування керамічних виробів, зокрема з карбїду кремнію, як і будь-якого крихкого неметалевого матеріалу, докорінно відрізняється від процесу алмазного шліфування металів [8–10]. При шліфуванні крихких неметалевих матеріалів мають місце пружно-пластична деформація без руйнування, диспергування кластерів матеріалу під час його пластичної деформації і крихке руйнування зі сколюванням частинок. Імовірність тих або інших механізмів руйнування матеріалу визначається як фізико-механічними властивостями матеріалу, так і навантаженням на алмазні зерна шліфувального інструменту (залежно від режиму обробки). Характерним результатом знімання припуску при шліфуванні є формування осередків руйнування в наслідок бічних виколів і виривів кластерів з послабленням поверхневого шару до стану двошарової комбінації рельєфного й зруйнованого шарів [11]. Кластерну модель утворення й видалення частинок шламу використовують при теоретичному вивченні закономірностей взаємодії зерен абразивного порошку з оброблюваною поверхнею з неметалевих матеріалів [12, 13].

Характер руйнування крихкого неметалевого матеріалу, яким є кераміка карбїду кремнію, залежить, головним чином, від значення нормальної сили, з

якою діє алмазне зерно. При досягненні нормальною силою критичного значення, необхідного для формування бічних тріщин, руйнування відбувається за рахунок сколювання оброблюваного матеріалу.

Виходячи лише з фізико-механічних властивостей крихких неметалевих матеріалів без врахування власне умов алмазно-абразивної обробки (режиму шліфування та ін.), авторами [14] запропоновано визначати критичне значення сили, необхідної для утворення бічних тріщин, із залежності $P_{кр} = k_p \frac{K_{Ic}^4}{H_\mu^3}$,

де k_p – сталий коефіцієнт, K_{Ic} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень I типу, а H_μ – мікротвердість.

З іншого боку, авторами [11] експериментально доведено, що під час алмазно-абразивної обробки максимальна напівдовжина дефектів обробки в поверхневому шарі керамічного матеріалу і критична довжина l_m медіанної тріщини при інденгуванні, за якої тріщина розвивається стало, тісно корелюють. Чим менший індекс крихкості матеріалу, а отже, більша критична довжина l_m медіанної тріщини при інденгуванні, тим більші значення напівдовжини максимальної тріщини від обробки й глибини зруйнованого шару виробу слід очікувати. Критичну довжину медіанної тріщини, за якої остання починає стало розвиватися при інденгуванні, в [14] запропоновано визначати як обернено пропорційну квадрату індексу крихкості матеріалу

$$l_m = \frac{k_m}{(H_\mu / K_{Ic})^2}, \text{ де } k_m \text{ – сталий коефіцієнт.}$$

Наведені показники порівнювали для матеріалів, які використовують для виготовлення керамічних куль, щоб за фізико-механічними властивостями (табл. 1) ранжувати їх за оброблюваністю. За базу для порівняння було прийнято відповідні показники діоксиду цирконію.

Таблиця 1. Деякі фізико-механічні властивості керамічних матеріалів, отриманих методом гарячого пресування або реакційного спікання

Показник	Керамічний матеріал				
	ZrO ₂ [11]	Si ₃ N ₄ * [11]	Al ₂ O ₃ * [11]	SiC** [15]	B ₄ C* [15]
Густина, 10 ⁻³ кг/м ³	5,95	3,10	3,90	3,12	2,48–2,52
Модуль пружності, ГПа	205	310	365	413	420–430
Мікротвердість H_μ , ГПа	11,0	13,9	14,9	20,0	22,0–25,0
Границя міцності під час згинання R_{bm} , МПа	230	690	930	370	210–230
Індекс крихкості H_μ/K_{Ic}	2,50	3,23	3,55	4,35	6,29–6,41
Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень I типу K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	4,4	4,3	4,2	4,6	3,5–3,9

*Гаряче пресування.

**Реакційне спікання.

Отже, за критичним значенням нормальної сили алмазного зерна, необхідним для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі, досліджувані керамічні матеріали ZrO₂, Si₃N₄, Al₂O₃, SiC, B₄C ранжуються таким чином: 1:0,45:0,32:0,18:0,05. Вважається [11], що за меншого критичного значення

сили, необхідної для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі, є меншим критичне значення площі перерізу зрізу матеріалу на зерні, за якого відбуваються виколи, і відповідно у стільки ж разів менша глибина різання, потрібна для утворення виколів. З іншого боку, при однаковій глибині різання виколи на обробленій поверхні керамічного матеріалу мають бути тим більшими, чим меншим є критичне значення сили, необхідної для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі.

За критичним значенням довжини медіанної тріщини, при якому вона починає стало розвиватися при індентуванні, досліджувані керамічні матеріали ранжуються таким чином: 1:0,59:0,47:0,35:0,15. Тобто, глибина зруйнованого шару на обробленій поверхні має бути найбільшою у діоксиду цирконію й найменшою у карбїду бору.

Метою дослідження у даній роботі було вивчення впливу режиму обробки з обмеженням за схильністю матеріалу до тріщиноутворення на показники алмазного шліфування керамічних куль з карбїду кремнію.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження впливу режиму обробки на показники алмазного шліфування заготовок керамічних куль з реакційно спеченого карбїду кремнію проводили на модернізованому шарикошліфувальному верстаті мод. ВШ-Д204М з встановленим на його робочому столі технологічним пристроєм (рис. 3) для утримання куль між конусними поверхнями верхнього диска і прижимного кільця. Як видно зі схеми обробки на рис. 4, за допомогою пристрою розділено кінематичні ланцюги, якими забезпечують здійснення власне формоутворювальних і переносних рухів від кінематичного ланцюга, яким забезпечують здійснення безпосередньо процесу шліфування. Це дозволяє проводити обробку куль при оптимальних швидкостях шліфування 25–30 м/с і швидкостях переміщення куль 0,15–0,30 м/с [2, 3].



Рис. 3. Розташування керамічних куль у пристрої верстату ВШ-Д204М.

У дослідах застосували алмазний шліфувальний круг форми 6А2Т з алмазами марки АС32 зернистістю 250/200 з відносною концентрацією 100. Кількість куль у партії, що оброблювали одночасно, складала 8 шт.

Досліджували вплив режимних параметрів: дискретної подачі круга на візання s_v , часу шліфування куль між подачами $t_{ш}$ і швидкості обертання стола з кулями в сепараторі n_1 , на швидкість знімання припуску $v_d = \Delta d/t$ (швидкість зменшення діаметра), швидкість змінювання (зменшення або збільшення) відхилення від сферичної форми $v_\delta = \Delta\delta/t$ і швидкість змінювання різнорозмірності діаметра куль у партії $v_{\Delta d} = \Delta d_n/t$. Вказані показники обрахо-

ували після безпосереднього вимірювання діаметра кожної кулі або відхилення від сферичної форми до і після обробки та застосування процедури виокремлення із загального значення показника частки, обумовленої власне впливом режиму обробки.

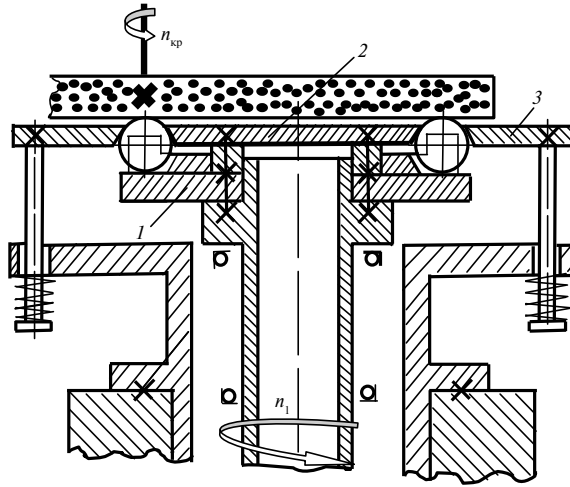


Рис. 4. Схема шліфування керамічних куль у пристрої з розділенням кінематичних ланцюгів: нижній (1) і верхній (2) диски, прижимне кільце (3); частота обертання стола з кулями (n_1) і алмазного круга ($n_{кр}$).

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

Вимірювання відхилення від сферичної форми кулі Δ_{RSw} (як радіальної відстані між найменшою описаною сферою й найбільшою вписаною сферою, центри яких співпадають – згідно стандарту) проводили за допомогою індикатору часового типу МИГ-1 з ціною ділення шкали вимірювань 1 мкм, закріпленим на магнітному штативі. Вимірювану кулю розташовували на базовому кільці із зовнішньою й внутрішньою фасками, щоб максимально наблизитися до умов контакту кулі й кільця по окружності. Базовий діаметр кільця обирали як діаметр окружності, вписаної у рівносторонній трикутник, який у свою чергу є вписаним у окружність з максимальним діаметром кулі. В результаті вимірювань при повороті кулі на базовому кільці знаходили максимальне й мінімальне значення відхилення поверхні кулі, різницю між якими вважали за відхилення від сферичної форми кулі Δ_{RSw} , і обраховували ненормований показник – середнє значення відхилення від сферичної форми куль у партії Δ_{RSwL} до й після обробки.

Далі за обрахованими значеннями D_{wmL} , V_{DwL} і Δ_{RSwL} (вихідними й після проведення дослідів) будували графіки змінювання цих характеристик у загальному часі проведення досліду у вигляді сукупності дискретних точок і виокремлювали власне вплив режиму обробки, який відбувається на фоні загальної тенденції до монотонного лінійного або нелінійного спадання цих

показників від свого вихідного значення до рівня мінімально можливого значення за даної схеми шліфування й даного часу обробки. Зазначена тенденція обумовлена, на думку авторів, по-перше, поступовим переходом від обробки послабленого поверхневого шару як двошарової комбінації рельєфного й зруйнованого шарів до обробки власне основного матеріалу й пов'язаним з цим підвищенням фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, що призводить до зменшення окружної подачі шліфування (тобто швидкості набігання на круг оброблюваного матеріалу) через саморегулювання кутової швидкості кочення кулі під дією сил тертя-зчеплення і різання. По-друге, вказана тенденція обумовлена одночасним монотонним збільшенням частки часу обробки саме основного матеріалу у загальному часі проведення досліду.

Для виокремлення впливу режиму обробки використали метод графічної апроксимації вказаних залежностей у вигляді сукупностей дискретних точок D_{wml} , V_{DwL} й Δ_{RSwL} монотонними безперервними функціями у часі [16]. Наслідком впливу режиму обробки у досліді вважали різницю між зміною обрахованого з досліду значення кожного показника (Δd , Δd_n і $\Delta \delta$) та відповідною зміною значення апроксимаційної функції у цей момент загального часу обробки. За допомогою саме вказаної різниці обраховували швидкості змінювання показників під впливом режиму обробки в мкм/год.

Для вивчення змінюваності недетермінованих об'єктів – вихідних показників процесу – було вибрано повний факторний експеримент типу 2^3 , оскільки була відсутня кількісна оцінка ступеню впливу факторів. Матрицю планування експерименту з урахуванням взаємодії факторів наведено у табл. 2, де дослід зі всіма факторами на нижніх рівнях позначено (I), як зазвичай це прийнято в літературі [17].

Таблиця 2. Матриця планування експерименту типу 2^3 у відносних величинах

Номер досліду	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	Позначення досліду	y
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	(I)	y_1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	a	y_2
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	b	y_3
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	c	y_4
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	ab	y_5
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	ac	y_6
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	bc	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	abc	y_8

У першій серії дослідів план експерименту передбачав варіювання всіх факторів на наступних двох рівнях: дискретна подача круга на врізання s_b дорівнювала 50 і 70 мкм, час шліфування куль між подачами $t_{ш}$ – 10 і 20 хв, швидкість обертання стола з кулями в сепараторі n_1 – 35 і 85 об/хв. Кількість куль у партії, що оброблювали одночасно, складала 8 шт. Вихідне значення відхилення від сферичної форми становило 540 мкм, час проведення кожного досліду – 40 хв.

У другій серії дослідів фактори варіювали на наступних двох рівнях: дискретну подачу круга на врізання s_b – на рівнях 20 і 40 мкм, час шліфування куль між подачами $t_{ш} = 10$ і 20 хв, швидкість обертання стола з кулями в се-

параторі $n_1 = 20$ і 60 об/хв. Кількість куль у партії, що оброблювалися одночасно, складала 7 шт. Вихідне значення відхилення від сферичної форми становило 200 мкм, час проведення кожного дослідю – 40 хв.

За отриманими результатами дослідів будували моделі вихідних змінних процесу від факторів урахуванням їх взаємодії у вигляді [17]

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{k+1}x_1x_2 + \dots + b_{2k}x_{k-1}x_k,$$

в якій коефіцієнти моделі розраховують за формулами

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ji} Y_i, \quad j = \overline{0, k};$$

$$b_{j+k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ji} X_{(j+1)i} + X_{ji} X_{(j+2)i}) Y_i, \quad j = \overline{1, k}$$

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [17], під час обрахунку середніх значень показників, що вимірювали – діаметра й відхилення від сферичної форми куль, серед останніх, з довірчою імовірністю $0,95$, не знайдено результатів, що різко відрізняються від інших. Перевірка дисперсій вибірок за критерієм Кохрена показала, що вони є однорідними. Тому найкращою оцінкою дисперсії відтворюваності буде середньозважена дисперсія

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

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.

Як видно з рис. 5, змінювання $D_{\text{вмL}}$ і $V_{D_{\text{вмL}}}$ від часу шліфування t при проведенні й першої, і другої серій дослідів можна апроксимувати лінійною залежністю, а залежність $\Delta_{\text{RS}_{\text{вмL}}}$ від t є монотонно спадаючою кривою, що наближається до свого мінімального значення (рис. 6).

Для визначення тієї складової вищевказаних показників процесу, змінювання якої не залежить від впливу режиму обробки, застосовано метод графічної апроксимації, запропонований у [16]. Додатні чи від'ємні значення відповідних складових A_3 отримували в результаті віднімання апроксимованого значення A_2 від його поточного значення A_1 у досліді (табл. 3, 4). Від'ємне значення A_1 у досліді означає, що вимірюваний показник в результаті проведення дослідю збільшується, відповідно від'ємне значення A_3 означає, що вплив режиму обробки призводить до зменшення поточного значення вимірюваного у досліді показника відносно апроксимованого значення. В табл. 3, 4 наведено розраховані таким чином значення тієї частини показників процесу, що залежать від режиму обробки.

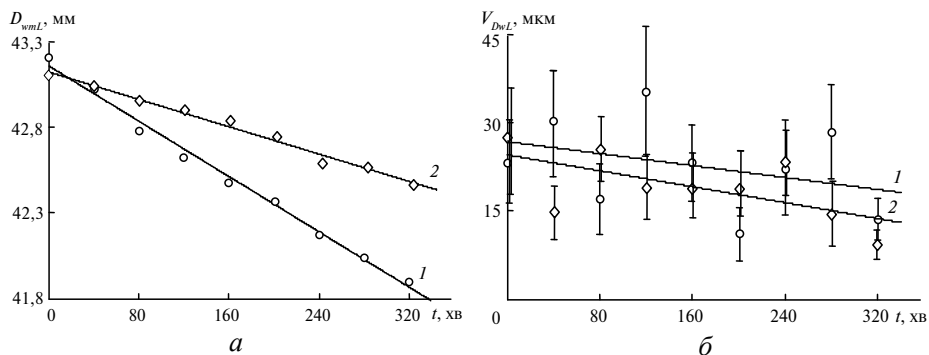


Рис. 5. Залежність середнього діаметра партії куль D_{wmL} (а) і різномірності діаметра куль у партії V_{DwL} (б) від часу шліфування t у першій (1) і другій (2) серії дослідів.

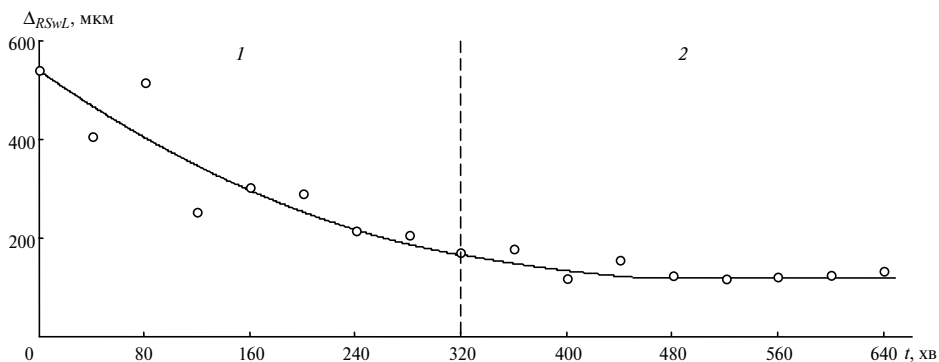


Рис. 6. Залежність середнього значення відхилення від сферичної форми куль у партії Δ_{RSwL} від часу шліфування t : перша (1) й друга (2) серії дослідів.

Таблиця 3. Матриця змінювання факторів, що варіюються, у абсолютних величинах, значення вихідних показників процесу у першій серії дослідів

Номер дослід-ду	S_b , МКМ	$t_{ш}$, ХВ	n_1 , ОБ/ХВ	Δd , МКМ			V_{d_r} , МКМ/ГОД	Δd_n , МКМ			$V_{\Delta d_r}$, МКМ/ГОД	$\Delta \delta$, МКМ			V_{δ_r} , МКМ/ГОД
				A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3	
1	50	10	35	189	161,5	27,5	41,4	-7	0,9	-7,9	-11,8	134	58	76	113,6
2	70	10	35	246	161,5	84,5	127,1	13	0,9	12,1	18,1	-111	55	-166	-248,8
3	50	20	35	151	161,5	-10,5	-16,3	-17	0,9	-17,9	-26,9	264	50	214	321,0
4	70	20	35	151	161,5	-10,5	-15,7	11	0,9	10,1	15,1	-48	45	-93	-138,8
5	50	10	85	111	161,5	-50,5	-75,4	11	0,9	10,1	15,2	9	40	-31	-46,9
6	70	10	85	192	161,5	30,5	45,7	-10	0,9	-10,9	-16,3	76	35	41	62,1
7	50	20	85	131	161,5	-30,5	-45,7	-6	0,9	-6,9	-10,4	8	31	-23	-33,9
8	70	20	85	147	161,5	-14,5	-21,2	14	0,9	13,1	19,6	36	26	10	14,6

Примітка. A_1 , A_2 і A_3 – значення Δd , $\Delta \delta$, Δd_n відповідно з дослідів, при апроксимації і що залежать від впливу режиму обробки.

Таблиця 4. Матриця змінювання факторів, що варіюються, у абсолютних величинах, значення вихідних показників процесу у другій серії дослідів

Номер дослід-ду	S_B , МКМ	$t_{ш}$, хв	n_1 , об/хв	Δd , МКМ			v_d , МКМ/ГОД	Δd_n , МКМ			$v_{\Delta d}$, МКМ/ГОД	$\Delta \delta$, МКМ			v_{δ} , МКМ/ГОД
				A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3	
1	20	10	20	62	81	-19	-29,1	12	1,2	10,8	16,2	19	21	-2	-2,6
2	40	10	20	84	81	3	4,5	-10	1,2	-11,2	-16,8	60	16	44	66,4
3	20	20	20	58	81	-23	-34,1	6	1,2	4,8	7,2	-36	12	-48	-72,2
4	40	20	20	62	81	-19	-28,7	0	1,2	-1,2	-1,8	30	7	23	34,9
5	20	10	60	92	81	11	15,9	0	1,2	-1,2	-1,8	6	0	6	8,4
6	40	10	60	154	81	73	108,9	-2	1,2	-3,2	-4,8	-1	0	-1	-1,7
7	20	20	60	29	81	-52	-78,0	6	1,2	4,8	7,2	-4	0	-4	-6,0
8	40	20	60	95	81	-14	21,6	5	1,2	3,8	5,7	-10	0	-10	-14,6

Примітка. A_1 , A_2 і A_3 – значення Δd , $\Delta \delta$, Δd_n відповідно з дослідів, при апроксимації і що залежать від впливу режиму обробки.

За наведеними результатами побудовано лінійні моделі вихідних змінних процесу з урахуванням взаємодії факторів, що варіюються, у нормованому вигляді:

для першої серії дослідів

$$v_d = 4,9922 + 28,9922x_1 - 29,7422x_2 - 29,1328x_3 - 22,7109x_1x_2 + 7,4297x_1x_3 + 20,4141x_2x_3 - 1,4297x_1x_2x_3;$$

$$v_{\delta} = 5,3672 - 83,0859x_1 + 35,3672x_2 - 6,3984x_3 - 19,7109x_1x_2 + 122,4609x_1x_3 - 43,9922x_2x_3 + 4,6172x_1x_2x_3;$$

$$v_{\Delta d} = 0,3375 + 8,8125x_1 - 0,9375x_2 + 1,6875x_3 + 9,1875x_1x_2 - 9,1875x_1x_3 + 3,5625x_2x_3 + 6,1875x_1x_2x_3;$$

для другої серії дослідів

$$v_d = -2,3839 + 28,9554x_1 - 27,4018x_2 + 19,4732x_3 - 2,7054x_1x_2 + 19,2054x_1x_3 - 17,8661x_2x_3 + 4,3661x_1x_2x_3;$$

$$v_{\delta} = 1,5804 + 19,6875x_1 - 16,0446x_2 - 5,0625x_3 + 4,9554x_1x_2 - 24,3482x_1x_3 + 9,2411x_2x_3 - 4,5804x_1x_2x_3;$$

$$v_{\Delta d} = 1,3875 - 5,8125x_1 + 3,1875x_2 + 0,1875x_3 + 3,1875x_1x_2 + 4,6875x_1x_3 + 1,6875x_2x_3 - 2,8125x_1x_2x_3.$$

Статистичну значимість коефіцієнтів рівнянь регресії перевіряли за критерієм Стюдента за умовою виконання нерівності

$$t_j = \frac{|b_j|}{S(b_j)} > t_p(f),$$

де $S(b_j) = S(\bar{y})/\sqrt{N}$ – середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів; $t_p(f)$ – табличне значення критерію Стюдента за $p = 95\%$ і числа ступенів свободи $f = N(m - 1)$. Якщо нерівність виконується, коефіцієнт значимо відрізняється від нуля.

Для першої серії дослідів результат перевірки статистичної значимості коефіцієнтів рівнянь регресії є наступним: показника v_d – шість статистично значимих коефіцієнтів (крім b_7), показника v_δ – чотири статистично значимі коефіцієнти (крім b_3, b_4 і b_7) і показника $v_{\Delta d}$ – п'ять статистично значимих коефіцієнтів (крім b_2 і b_3). Для другої серії – відповідно сім статистично значимих коефіцієнтів, три статистично значимі коефіцієнти (крім b_3, b_4 і b_6, b_7) і шість статистично значимих коефіцієнтів (крім b_3).

Для перевірки адекватності отриманих рівнянь регресії експериментальним результатам за критерієм Фішера спочатку розраховували дисперсію адекватності результатів розрахунку по вище наведеним моделям:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2,$$

де \hat{y}_i – результат розрахунку по кожній моделі; l – число значимих коефіцієнтів рівнянь регресії. Рівняння регресії є адекватними експериментальним результатам, якщо виконується умова

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{відтв}}^2} \leq F_{1-p}(f_{\text{ад}}, f_{\text{відтв}}),$$

де $F_{1-p}(f_{\text{ад}}, f_{\text{відтв}})$ – табличне значення критерію Фішера для $p = 0,05$ і чисел ступенів свободи $f_{\text{ад}} = (N-l)$, $f_{\text{відтв}} = N(m-1)$. Оскільки для отриманих рівнянь регресії вищенаведена умова за критерієм Фішера виконується, зроблено висновок про адекватність рівнянь регресії експериментальним результатам (табл. 5).

Таблиця 5. Розрахунок статистичних величин для перевірки адекватності рівнянь регресії експериментальним результатам

Показник	Серія дослідів					
	перша			друга		
	v_d	v_δ	$v_{\Delta d}$	v_d	v_δ	$v_{\Delta d}$
$S_{\text{відтв}}^2$, мкм ²	57,7	9261,2	54,0	29,8	2259,3	24,1
$S_{\text{ад}}^2$, мкм ² /год ²	65,4	7212,5	14,9	0	1753,5	0,1
Розрахований F -критерій $F = S_{\text{ад}}^2 / S_{\text{відтв}}^2$	1,134	0,779	0,31	0	0,776	0,006
Табличний F -критерій для $p = 0,05$ і чисел ступенів свободи $f_{\text{ад}} =$ ($N-l$), $f_{\text{відтв}} = N(m-1)$	3,162 $(f_{\text{ад}} = 2,$ $f_{\text{відтв}} = 56)$	2,536 $(f_{\text{ад}} = 4,$ $f_{\text{відтв}} = 56)$	2,784 $(f_{\text{ад}} = 3,$ $f_{\text{відтв}} = 56)$	4,040 $(f_{\text{ад}} = 1,$ $f_{\text{відтв}} = 48)$	2,405 $(f_{\text{ад}} = 5,$ $f_{\text{відтв}} = 48)$	2,405 $(f_{\text{ад}} = 5,$ $f_{\text{відтв}} = 48)$

З урахуванням результатів перевірки на адекватність маємо побудовані моделі вихідних змінних процесу у реальних величинах:
для першої серії дослідів

$$v_d = 4,99219 + 0,4832s_B - 1,98281t_{\text{ш}} - 0,48555n_1 - 0,02523s_B t_{\text{ш}} + 0,00206s_B n_1 + 0,002268t_{\text{ш}} n_1;$$

$$v_\delta = 5,36719 - 1,38477s_B + 2,35781t_{\text{ш}} + 0,03402s_B n_1 - 0,04888t_{\text{ш}} n_1;$$

$$v_{\Delta d} = 0,3375 + 0,14687s_B + 0,01021s_B t_{ш} - 0,00255s_B n_1 + \\ + 0,00396t_{ш} n_1 + 0,00011s_B t_{ш} n_1;$$

для другої серії дослідів

$$v_d = -2,38393 + 0,96518s_B - 1,82679t_{ш} + 0,48683n_1 - 0,00601s_B t_{ш} + \\ + 0,016s_B n_1 - 0,02978t_{ш} n_1 + 0,00024s_B t_{ш} n_1;$$

$$v_8 = 1,58036 + 0,65625s_B - 1,06964t_{ш} - 0,02029s_B n_1.$$

$$v_{\Delta d} = 1,3875 - 0,19375s_B + 0,2125t_{ш} + 0,00708s_B t_{ш} + 0,00391s_B n_1 + \\ + 0,00281t_{ш} n_1 - 0,00016s_B t_{ш} n_1.$$

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як видно з отриманих рівнянь регресії, вплив взаємодії факторів для кожного з вихідних показників процесу є на 1–3 порядки меншим за вплив власне досліджуваного фактору, тобто вказані рівняння регресії можна вважати практично лінійними залежностями від досліджуваних факторів. Найбільший вплив на швидкість v_d , а також швидкість v_8 має час шліфування $t_{ш}$ і цей вплив оцінюється значенням коефіцієнту впливу для v_d рівним 1,8–2,0, а для v_8 – до 2,4. Вплив подачі на врізання s_B є менш значним: для v_d – 0,5–1,0, для v_8 – до 1,4. Слід зазначити також відсутність прямого впливу швидкості обертання стола з кулями n_1 на швидкість v_8 , а також швидкість $v_{\Delta d}$ – присутній лише опосередкований вплив n_1 через взаємодію факторів. До того ж прямий вплив інших факторів на швидкість $v_{\Delta d}$ не є значним – 0,1–0,2.

Оскільки стратегічною метою процесу алмазного шліфування керамічних куль є в першу чергу максимально можливе виправлення форми куль і лише в другу чергу досягнення прийнятної продуктивності процесу й різномірності діаметра куль у партії, саме враховуючи це слід визначати режим алмазного шліфування керамічних куль з карбїду кремнію. Тому для визначення рекомендацій з вибору режимів обробки є доцільним ранжувати отримані результати за зменшенням апроксимованого значення відхилення від сферичної форми (див. рис. 6) й аналізувати вплив режимів обробки окремо у трьох діапазонах змінювання значення цього показника, а саме: вище за 300 мкм (I), між 300 і 150 мкм (II) і нижче за 150 мкм (III). У табл. 6 наведено значення вихідних змінних процесу, які розраховано за отриманими моделями, і позначено позитивний або негативний результат впливу режимів обробки на виправлення відхилення від сферичної форми куль.

Як видно з табл. 6 і рис. 7, у діапазоні I позитивний результат (забезпечення від'ємного показника v_8) досягається зі збільшенням подачі круга на одиницю кутової швидкості $s_{\omega} = s_B/\omega_k$ з 14 до 19 мкм·с/рад, і результат тим кращий, чим менший час $t_{ш}$ (див. рис. 7, а). У діапазоні II чіткої тенденції залежності v_8 від s_{ω} не спостерігається. З одного боку, за подачі $s_B = 40$ –70 мкм краще працювати зі зменшенням s_{ω} з 8 до 6 мкм·с/рад, а також зменшенням $t_{ш}$ і s_B , але, з іншого боку, за роботи в діапазоні подач $s_B = 20$ –40 мкм маємо збільшувати s_{ω} з 8 до 10 мкм·с/рад і одночасно збільшувати час $t_{ш}$. На рис. 7, б показано загальну тенденцію змінювання v_8 за умови, якщо потрібно вибирати подачу s_{ω} з альтернативи 6 чи 10 мкм·с/рад, не забуваючи при цьому, що значення подачі $s_{\omega} = 8$ мкм·с/рад є вкрай неефективним. У діапазоні III позитивний результат слід очікувати за змінювання s_{ω} у межах 3–6 мкм·с/рад, а також збільшенні $t_{ш}$ і s_B з 20 до 40 мкм (див. рис. 7, в).

Таблиця 6. Ранжування режимних параметрів за зменшенням апроксимованого значення відхилення від сферичної форми, значення вихідних змінних процесу, подачі круга на одиницю кутової швидкості

S_{ω} , МКМ	$t_{ш}$, ХВ	n_1 , об/ХВ	V_d , МКМ/ГОД	V_{δ} , МКМ/ГОД	$V_{\Delta d}$, МКМ/ГОД	S_{ω} , МКМ·С/РАД	Позитивний (+) і негативний (-) результати
50	10	35	40,0	131,6	-11,1	14	-
70	10	35	128,6	-279,5	18,9	19	++
50	20	35	-14,9	290,3	-24,2	14	-
70	20	35	-17,2	-120,8	17,8	19	+
50	10	85	-73,9	-25,4	12,5	6	+
70	10	85	44,3	53,4	-19,0	8	-
50	20	85	-47,2	-42,6	-11,1	6	++
70	20	85	-19,8	36,1	18,9	8	-
20	10	20	-29,1	-26,4	16,4	10	+
40	10	20	4,5	61,7	-16,6	19	-
20	20	20	-34,1	-58,5	7,4	10	+++
40	20	20	-28,7	29,6	-1,6	19	-
20	10	60	15,9	22,3	-2,0	3	-
40	10	60	108,9	13,0	-5,0	6	-
20	20	60	-78,0	-9,8	7,0	3	+
40	20	60	21,6	-19,1	5,5	6	++

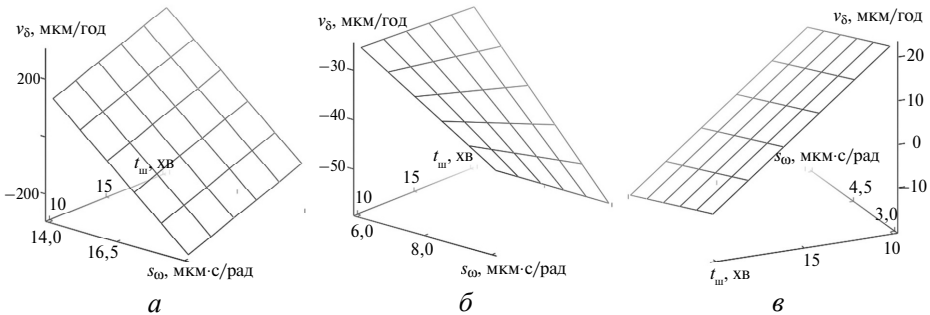


Рис. 7. Залежності показника v_{δ} від подачі s_{ω} і часу шліфування $t_{ш}$ у діапазонах I (а), II (б) і III (в).

З табл. 6 видно також, що для зменшення різнорозмірності діаметра куль у партії для всіх трьох діапазонів краще використовувати режими, прямо протилежні зазначеним вище, і які є ефективними для забезпечення від'ємного показника v_{δ} .

З позиції забезпечення прийнятної продуктивності процесу слід відзначити незначний вплив режимних параметрів на зменшення діаметра куль і звернути увагу на вдвічі нижчу продуктивність процесу обробки у діапазоні III, коли апроксимоване значення відхилення від сферичної форми практично не змінюється.

ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження впливу режиму обробки на показники алмазного шліфування керамічних куль з карбиду кремнію визначено найбільш ефективне з точки зору максимально можливого виправлення

форми куль поєднання досліджуваних факторів, яке є різним для трьох діапазонів змінювання цього відхилення. У діапазоні вище за 300 мкм – це поєднання збільшення s_{ω} до 19 мкм·с/рад і зменшення $t_{ш}$ до 10 хв, у діапазоні між 300 і 150 мкм – зменшення s_{ω} до 10 мкм·с/рад і збільшення $t_{ш}$ до 20 хв, у діапазоні нижче за 150 мкм s_{ω} слід витримувати у межах 3–6 мкм·с/рад, $t_{ш}$ збільшувати до 20 хв.

Напроти, зниження різнорозмірності діаметра куль у партії у всіх трьох діапазонах слід очікувати за режимів, прямо протилежних зазначеним.

З позиції забезпечення прийнятної продуктивності процесу обробки слід відзначити незначний вплив режимних параметрів і вдвічі нижчу продуктивність в умовах, коли значення відхилення від сферичної форми куль залишається практично незмінним поблизу свого мінімуму.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния режима обработки на процесс алмазного шлифования керамических шаров из карбида кремния, показателями которого являются скорость уменьшения диаметра шаров, скорость изменения (уменьшения/увеличения) отклонения от сферической формы и скорость изменения разноразмерности диаметра шаров в партии. Для выделения доли, обусловленной собственно влиянием режима обработки, применен метод графической аппроксимации изменения во времени средних значений показателей точности шаров в партии. Установлено, что выделенные доли могут изменяться как в сторону возрастания, так и снижения в зависимости от значения параметров режима обработки, а именно: подачи алмазного круга на врезание, частоты подачи круга и скорости вращения стола с шарами. В результате проведения полных факторных экспериментов типа 2^3 определено наиболее эффективное для исправления формы шаров сочетание исследуемых факторов, разное для трех диапазонов изменения этого отклонения, а именно: выше 300 мкм, в пределах 150–300 мкм и ниже 150 мкм.

Ключевые слова: керамические шары из карбида кремния, алмазное шлифование, подача алмазного круга на врезание, частота подачи круга, скорость вращения стола с шарами, диаметр и отклонение от сферической формы шаров, разноразмерность диаметра шаров в партии.

In article influence of machining conditions was experimentally investigated for diamond grinding of ceramic balls from silicon carbide which characterized in particular the rate of decrease of ball diameter, the rates of change (decrease/increase) of deviation from spherical form and variation of ball lot diameter. The share is allocated in these indicators that actually depended on the effect of the factor of machining conditions. For this, the method of graphical approximation is applied for the time variation of the characteristics of accuracy of ball lot. It is found that the selected shares of the process indices can change both as increasing and as decreasing depending on the value of the parameters of the machining conditions. They are the infeed feed of the diamond wheel, the frequency of wheel feed and the rotation speed of table with the balls. As result of full factor experiments of type 2^3 the best effective combination of factors was ascertained for maximally possible correction of ball form for three diapasons of changing in particular above 300 μm , 150–300 μm and lower 150 μm .

Keywords: ceramic balls from silicon carbide, diamond grinding, infeed feed of the diamond wheel, frequency of wheel feed, rotation speed of table with the balls, ball diameter, deviation from spherical form, variation of ball lot diameter.

1. Hybrid Ball Bearings. – <https://www.bearingworks.com/products/hybrid-ball-bearings.php>
2. 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. – К., 2007. – 340 с.
3. Пасичний О. О. Підвищення ефективності прецизійної алмазної обробки деталей типу “куля” з конструкційної кераміки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К., 2002. – 22 с.
4. ISO 3290-2:2014. – <https://www.iso.org/ru/standard/60133.html> (дата звернення 01.11.18).
5. Feng M., Wu Y., Yuan J., Ping Zh. Processing of high-precision ceramic balls with a spiral V-groove plate // Front. Mech. Eng. – 2017. – 12, N 1. – P. 132–142.

6. 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. Manuf. Tech. – 2016. – 84, N 9. – P. 2167–2178.
7. Ma W. High efficiency ultra-precision grinding of ceramic balls: Dissertation ... for the Doctoral Degree. – Saga: Saga University, 2013.
8. 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.
9. 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.
10. Прихна Т. А., Старостина А. В., Лицендорф Д., Петруша И. А., Ивахненко С. А., Боримский А. И., Филатов Ю. Д., Лошак М. Г., Серга М. А., Ткач В. Н., Туркевич В. З., Свердун В. Б., Клименко С. А., Туркевич Д. В., Дуб С. Н., Басюк Т. В., Карпец М. В., Моциль В. Е., Козырев А. В., Ковыляев В. В., Ильницька Г. Д., Кабьёш Т., Шартье П. Исследование стойкости к окислению, механических характеристик материалов на основе МАХ-фаз систем Ti–Al–(C,N) и возможности их использования в качестве инструментальных связок и для полирования // Сверхтв. материалы. – 2014. – № 1. – С. 14–26.
11. Гусев В. В., Калафатова Л. П. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики: монография. – Донецк: ГВУЗ “ДонНТУ”, 2012. – 250 с.
12. Филатов Ю. Д., Рогов В. В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Часть 1 // Сверхтв. материалы. – 1994. – № 3. – С. 40–43.
13. Филатов Ю. Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла / Сверхтв. материалы. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
14. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. – М.: Машиностроение, 1999. – 544 с.
15. Кулич В. Г., Куц В. И., Ткач В. Н., Майстренко А. Л. К вопросу о возможностях получения высокоплотных керамических изделий на основе самосвязанного карбида кремния // Сверхтв. материалы. – 2009. – № 1. – С. 18–35.
16. Sokhan S. V., Maystrenko A. L., Kulich V. H., Sorochenko V. H., Voznyy V. V., Gamaniuk M. P., Zubaniev Ye. M. Diamond grinding the ceramic balls from silicon carbide // J. Eng. Sci. – 2018. – 5, N 1. – P. A12–A20.
17. Кононюк А. Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента): В 4 т. Т. 2. – К.: Изд-во КНТ, 2011. – 453 с.

Надійшла 21.11.17

Після доопрацювання 04.09.18

Прийнята до опублікування 04.09.18