

# Дослідження процесів обробки

УДК 621.9.025.77:615.46:616.728

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

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

\*svsokh@gmail.com

## **Змінювання показників алмазного доведення керамічних куль з карбиду бору й нітриду кремнію**

*Для алмазного доведення керамічних куль з  $B_4C$  і  $Si_3N_4$  досліджено експериментально закономірності змінювання показників продуктивності та точності обробки, а саме: середнього діаметра куль у партії, різномірності діаметра куль у партії і середньоарифметичного варіації діаметра куль, а також швидкості змінювання цих показників. В результаті отримано лінійні або нелінійні апроксимаційні моделі цих показників, на основі яких розроблено метод визначення припуску на різних стадіях доведення залежно від заданого значення варіації діаметра куль.*

**Ключові слова:** керамічні кулі, карбід бору, нітрид кремнію, алмазне доведення, діаметр кулі і його варіація, різномірність діаметра куль у партії, апроксимаційні моделі, припуск на доведення.

### **ВСТУП**

Однією з областей застосування прецизійних керамічних куль є тіла кочення керамічних або гібридних шарикопідшипників. Повністю керамічні підшипники кочення застосовують в корозійно-активних середовищах (в хімічній і харчовій промисловості) в умовах низьких навантажень і частот обертання. Матеріал кілець і тіл кочення – частково стабілізований діоксид цирконію, оксид алюмінію, карбід кремнію або нітрид кремнію. Гібридні підшипники (з керамічними кулями) застосовують у високооборотних виробках з підвищеними вимогами до ресурсу й надійності. Успіх гібридних підшипників пов'язують, зокрема, з більш високими швидкостями обертання, ніж у стандартних сталевих підшипників, і в більшості випадків більшою довговічністю. Крім того, вони мають виняткову стійкість до високих температур. Так, за умовами роботи підшипника валу турбіни в реактивному дви-

гуні можна допускати обертання зі швидкістю понад 30000 об/хв і нагрів підшипника до температури понад 650 °С. Було доведено, що гібридні шарикопідшипники витримують такі умови краще, ніж підшипники зі сталевими кулями, а там, де температура газу перевищує 1100 °С, можуть застосовуватися тільки високоякісні керамічні матеріали [1]. Нітрид кремнію ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), який має високі втомні властивості, тріщиностійкість і низьку щільність, є основним матеріалом при виготовленні тіл кочення гібридних підшипників, хоча зберігається інтерес й до таких матеріалів, як оксид алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), діоксид цирконію ( $\text{ZrO}_2$ ) й карбіди кремнію ( $\text{SiC}$ ) й бору ( $\text{B}_4\text{C}$ ). Ряд фірм США, Європи, Японії, КНР і Росії вже сьогодні випускають та експлуатують керамічні або гібридні шарикопідшипники.

В 1990-х роках в Україні було створено ефективні керамічні й композиційні матеріали, зокрема на основі карбіду бору, а також технології виготовлення з них гарячим пресуванням прецизійних виробів типу “куля” [2, 3]. Як відомо, карбід бору є третім за твердістю матеріалом після алмазу й кубічного нітриду бору, і таким, що відноситься до одного із найбільш інертних хімічних з’єднань, має високу твердість, міцність й унікальну зносостійкість у агресивних і абразивних середовищах.

З початку 2000-х в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України застосовують спосіб спікання керамічних матеріалів на основі тугоплавких сполук в апаратах високого (до 8 ГПа) тиску (АВТ) [4, 5], який відрізняється від інших технологій гарячого пресування (ГП) і електроспікання можливістю реалізувати значно більш високі тиски для інтенсифікації процесів ущільнення й консолідації порошкових заготовок за більш низької температури. В той же час ці особливості дають змогу суттєво скоротити не тільки час нагрівання, але й охолодження заготовки, що впливає на зростання розміру зерна при рекристалізації. Порівняння фізико-механічних властивостей керамічних матеріалів з карбіду бору ( $\text{B}_4\text{C}$ ), отриманих традиційним ГП, спіканням під тиском в АВТ з електронагрівом, наведено в табл. 1.

**Таблиця 1. Фізико-механічні властивості керамічних матеріалів з  $\text{B}_4\text{C}$ , отриманих традиційним гарячим ГП і спіканням під тиском в АВТ**

Показник	Керамічний матеріал	
	$\text{B}_4\text{C}$ (ГП)	$\text{B}_4\text{C}$ (АВТ)
Густина, $10^6$ кг/м <sup>3</sup>	2,48–2,52	2,515–2,517
Модуль пружності $E$ , ГПа	420–430	420,6–430,6
Модуль зрушення $G$ , ГПа	178–182	178,1–181,9
Мікротвердість $H_v$ , ГПа	22,0–25,0	22,0–25,0
Міцність при згині $\sigma_s$ , МПа	210–230	210–230
Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень I типу $K_{Ic}$ , $10^{-6}$ Па·м <sup>-1/2</sup>	3,5–3,9	3,5–3,9

Найбільш складним при виготовленні підшипників кочення є технологічний процес виготовлення куль. Експлуатаційні властивості підшипників залежать, насамперед, від стану їхніх робочих поверхонь, який визначається точністю виготовлення, шорсткістю й мікроструктурою. Вимоги до точності та якості виготовлення прецизійних керамічних куль вельми високі: згідно стандарту ISO 3290-2:2014 [6] для керамічних куль з  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ступеня точності G16 відхилення від сферичної форми куль –  $\leq 0,4$  мкм, варіація діаметра кулі –  $\leq 0,4$  мкм, різнорозмірність діаметра куль у партії –  $\leq 0,4$  мкм, якість виго-

товлення поверхні виробів за параметром шорсткості  $Ra - \leq 0,025$  мкм. Вказані вимоги забезпечуються після надання сферичної форми заготовкам керамічних куль на операції алмазного шліфування і наступним груповим доведенням керамічних куль у декілька переходів з послідовним зменшенням зернистості алмазної суспензій на кожному переході.

Групова абразивна обробка куль між дисками-притирами є найбільш універсальною операцією формоутворення й доведення прецизійних куль і дотепер привертає увагу дослідників [7–10]. Під час масового виробництва сталевих чи керамічних куль за так званої “елеваторної” схеми доведення кулі постійно перемішуються у бункері перед подачею в робочу зону між дисками-притирами у одну (спірально) або кілька (кільцевих) канавок кочення у нижньому диску, а після циклу обробки автоматично скидаються у бункер. На відміну від масового у дрібносерійному або дослідному виробництві оброблювані кулі перекочуються між дисками однією канавкою і без перемішування. При цьому кількість одночасно оброблюваних куль обмежена місткістю канавки. Особливості групової алмазної обробки керамічних куль наведено в [11].

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) [12, 13]. У такому сенсі вплив згаданих технологій виготовлення керамічних куль з  $V_4C$  й  $Si_3N_4$  на їх алмазно-абразивну обробку (продуктивність, точність, якість) ще не досліджено.

Зважаючи на наведені особливості процесу виготовлення керамічних куль, метою дослідження є експериментальне визначення закономірностей змінювання показників алмазного доведення керамічних куль з  $V_4C$  і  $Si_3N_4$ , які характеризують продуктивність і точність обробки, а саме: середнього діаметра партії куль  $D_{vml}$  (тут і далі позначення згідно ISO 3290-2:2014) і різнорозмірності діаметра куль у партії  $V_{DvL}$ . Оскільки під час прецизійного алмазного доведення керамічних куль вказані показники визначальною мірою залежать від змінювання варіації діаметра кожної кулі, досліджували також закономірності змінювання останньої у партії куль, а також швидкості змінювання зазначених показників.

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили в умовах алмазного доведення керамічних куль  $\varnothing 12,7$  мм з  $V_4C$  (ГП),  $V_4C$  (АВТ) і  $Si_3N_4$  (АВТ). Доводочні верстати мод. ЗЕ-814 переобладнали на доведення куль й додатково оснастили перетворювачами частоти електричного струму, за допомогою яких регулювали частоту обертання нижнього диску-притиру в межах 19–25 об/хв. Верхній диск-притир не обертався і його пружно притискали до нижнього диску через оброблювані кулі із зусиллям 10–100 Н. Кулі, розділені одна від одної сепаратором з відкритими пазами (рис. 1), утримувалися в одній кільцевій канавці нижнього диску, розташованій на максимальній можливій відстані від осі обертання і яка мала V-подібний профіль, а їх кількість у партії становила 40 шт. Використовували послідовно суспензії алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 28/20, 14/10, 2/1 і 1/0 на основі оливи індустріальної И-20А. Для фінішного доведення куль суспензією алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 1/0 використовували шарикодовідний верстат мод. ВШ-ДЗ. Доведення

куль здійснювали доти, поки не буде виконана умова: варіація діаметра кожної кулі  $V_{D_{\text{DwS}}} \leq 0,4$  мкм.



Рис. 1. Розташування керамічних куль у сепараторі на шарикодвідному верстаті.

Оскільки доведення партії куль за такої схеми призводить до постійного збільшення різномірності діаметра куль у партії  $V_{D_{\text{DwL}}}$ , під час кожного сеансу доведення негативний вплив цього фактора компенсували розміщенням куль у пазах сепаратора за певною системою, а саме: здійснювали ранжування куль за спаданням значення середнього діаметра  $D_{\text{wmi}}$  у межах чотирьох груп, кожна з яких починалася з однієї з чотирьох куль з найбільшим діаметром. Кулі розташовували у сепараторі послідовно група за групою зі спаданням значення діаметра куль у межах групи відносно напрямку обертання нижнього диска. З іншого боку, за такої системи від сеансу до сеансу доведення постійно змінювалися положення практично кожної кулі у сепараторі, як і геометричні характеристики сусідніх з нею куль.

Методи визначення поточних значень вказаних показників дещо відрізнялися залежно від точності вимірювань. На попередніх переходах після застосування суспензії алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 28/20 і 14/10 вимірювання здійснювали встановленою на стійку оптичною вимірювальною трубкою ИК-6 з ціною поділки шкали вимірювань 1 мкм (рис. 2, праворуч). На фінішних переходах доведення після застосування суспензії алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 2/1 і 1/0 вимірювання здійснювали за допомогою мікрокатора 0,ИГПВ з ціною поділки шкали вимірювань 0,1 мкм (рис. 2, ліворуч).

Пристрої з довгоміром чи мікрокатором було попередньо налаштовано на фіксацію базового положення поверхні кулі-еталону  $\varnothing 12,700$  мм ступені точності G5 (з варіацією діаметра 0,13 мкм) в межах шкали вимірювань мікрокатора (8 мкм) наступним чином. Вимірювану кулю-еталон розташовували у напрямних призми на дві опорні точки, що забезпечувало її центрування навпроти щупу мікрокатора в одній вертикальній площині, й подавали уздовж напрямних призми до упору у додатковий горизонтальний установчий упор. Зафіксоване таким чином положення кулі забезпечувало її центрування навпроти щупу мікрокатора в іншій площині, яка є перпендикулярною вказаній. Під час провороту кулі-еталону в призмі в довільно вибраному напрямку з періодичною зміною цього напрямку фіксували діапазон відхилень покажчика приладів, середину якого вважали за базове положення поверхні кулі й початок відліку відхилень діаметра досліджуваних куль.



Рис. 2. Прилади для вимірювання діаметра кулі, його варіації з точністю 1 мкм (праворуч) і 0,1 мкм (ліворуч).

Під час вимірювання досліджуваної кулі її базування у призмі з додатковим упором повторювало базування кулі-еталону. А під час провороту кулі в призмі в довільно вибраному напрямку з періодичною зміною цього напрямку знаходили максимальне і мінімальне додатне чи від'ємне значення відхилення поверхні кулі від базового положення, різницю між якими з урахуванням знаку вважали варіацією діаметра кулі  $V_{Dws}$ . Середній діаметр кулі  $D_{wm}$  обчислювали як суму середнього діаметра кулі-еталону, мінімального значення відхилення поверхні кулі від базового положення з урахуванням знаку і половини варіації  $V_{Dws}$ . Вимірювання виконували до і після сеансу доведення, щоб зафіксувати змінювання досліджуваних показників у часі.

Середній діаметр куль у партії  $D_{wmL}$  обчислювали як середньоарифметичне значення середнього діаметру найбільшої й найменшої куль у партії. Різномірність діаметра куль у партії  $V_{DwL}$  обчислювали як різницю між середніми діаметрами найбільшої й найменшої куль у партії. Після кожного сеансу доведення визначали також середньоарифметичне значення  $V_{Dwm}$  варіацій (непостійності) діаметра куль.

Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [14] під час визначення дисперсій вказаних показників у партії куль не враховували з довірчою імовірністю 0,95 результати, які різко виділяються серед інших, для чого скористалися перевіркою дисперсій за критерієм Кохрена на однорідність.

Далі за обрахованими значеннями  $D_{wmL}$ ,  $V_{DwL}$  і  $V_{Dwm}$  будували графіки змінювання цих характеристик у часі у вигляді сукупності дискретних точок й апроксимації спадання цих показників лінійними або нелінійними функціями. Швидкості змінювання цих показників, а саме:  $v_D$ ,  $v_{VD}$  і  $v_{Vm}$ , обчислювали як середньоарифметичне значення відповідних  $i$ -тих показників за одиницю часу обробки. За результатами обчислень також будували графіки їх змінювання у часі у вигляді сукупності дискретних точок і апроксимації спадання цих показників лінійними або нелінійними функціями.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати досліджень представлено на рис. 3–12. На попередніх переходах доведення (див. рис. 3–6) меншу зернистість суспензії (АСМ 14/10 замість АСМ 28/20) застосували для куль з  $V_4C$  (ГП) – на 38 год,  $V_4C$  (АВТ) – на 40,5 год,  $Si_3N_4$  (АВТ) – на 20 год. На фінішних переходах доведення (див. рис. 7–11) меншу зернистість суспензії (АСМ 1/0 замість АСМ 2/1) застосували для куль з  $V_4C$  (ГП) – на 79,5 год,  $V_4C$  (АВТ) – на 0 год,  $Si_3N_4$  (АВТ) – на 51,5 год. Щоби уникнути похибки через значний розкид середніх значень деяких досліджуваних показників у реперних точках щодо апроксимаційних моделей цих показників, під час побудови графіків швидкостей змінювання показників застосували однаковий підхід – спиралися на значення зазначених моделей.

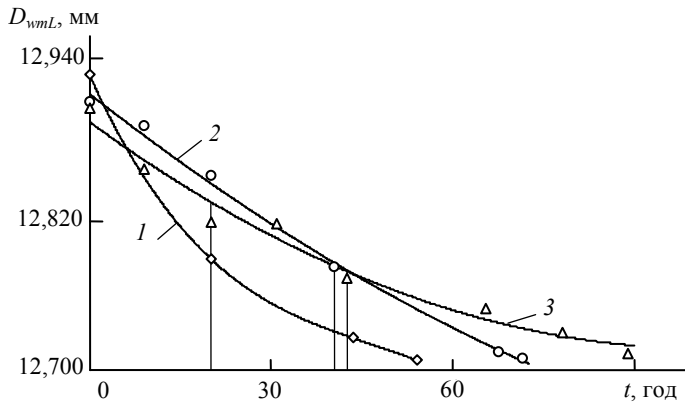


Рис. 3. Залежність середнього діаметра куль у партії  $D_{wmL}$  від часу доведення суспензіями АСМ 28/20 і АСМ 14/10 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $V_4C$  (АВТ) (2),  $Si_3N_4$  (АВТ) (3).

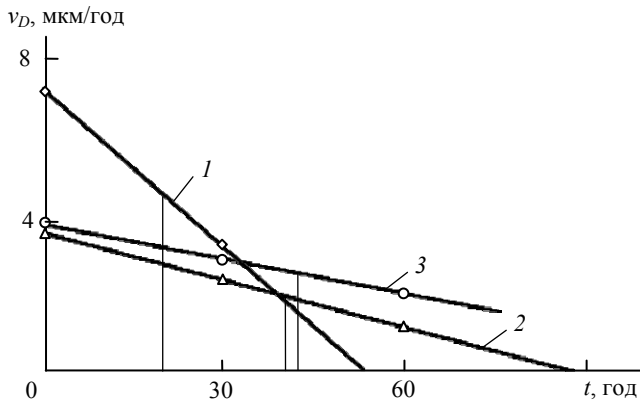


Рис. 4. Залежність швидкості зменшення діаметра куль  $v_D$  від часу доведення суспензіями АСМ 28/20 і АСМ 14/10 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $V_4C$  (АВТ) (2),  $Si_3N_4$  (АВТ) (3).

## ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як видно на рис. 3, 4 і 7, 8, незалежно від зернистості використовуваної суспензії мікропорошку алмазу продуктивність доведення куль, отриманих методом спікання під тиском в АВТ з електронагрівом, є суттєво відмінною від такої для куль, отриманих традиційним методом гарячого пресування. А швидкості зменшення діаметра куль і змінювання варіації їх діаметра не співпадають (див. рис. 4 і 6, 8 і 10, табл. 2), що потрібно враховувати під час призначення припуску на доведення. Виникає питання, яким чином визначи-

ти мінімальний припуск, якого буде достатньо для отримання готових куль із заданим значенням  $V_{Dws}$  за відомого його початкового значення?

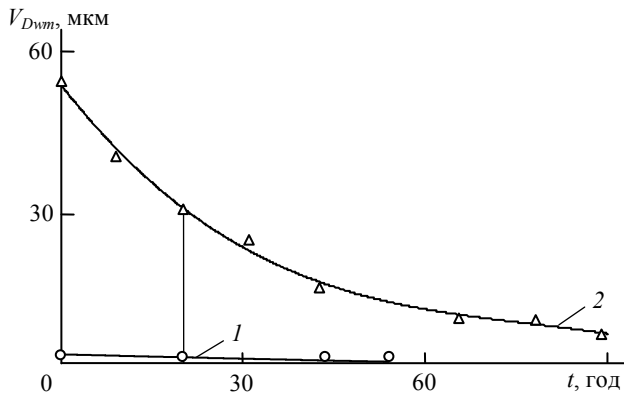


Рис. 5. Залежність середньоарифметичних варіацій діаметра куль  $V_{Dwm}$  від часу доведення суспензіями АСМ 28/20 і АСМ 14/10 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $Si_3N_4$  (АВТ) (2).

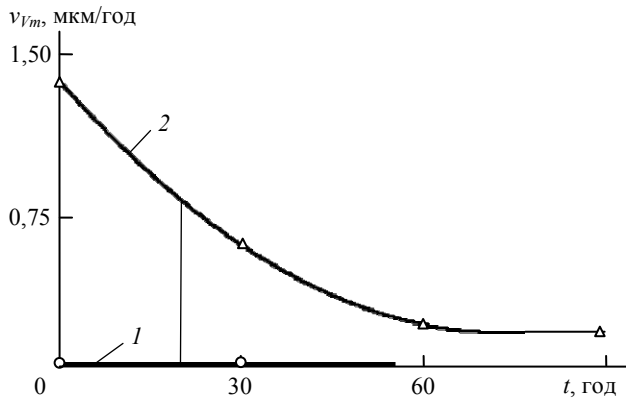


Рис. 6. Залежність швидкості варіації діаметра партії куль  $v_{Vm}$  від часу доведення суспензіями АСМ 28/20 і АСМ 14/10 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $Si_3N_4$  (АВТ) (2).

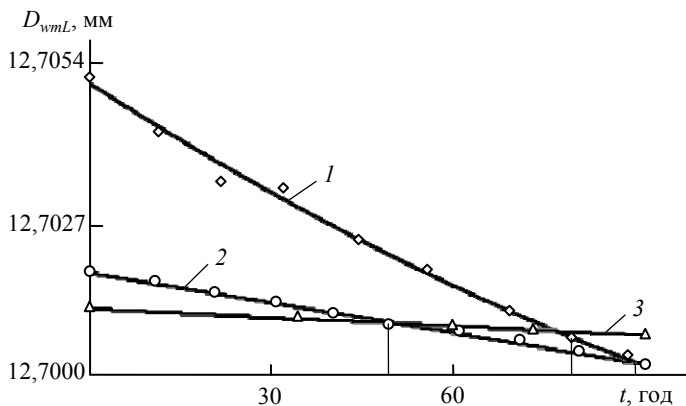


Рис. 7. Залежність середнього діаметра куль у партії  $D_{wml}$  від часу доведення суспензіями АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $V_4C$  (АВТ) (2),  $Si_3N_4$  (АВТ) (3).

Метод призначення припуску на різних стадіях доведення є наступною. Спираючись на експериментальні залежності змінювання варіації діаметра партії куль  $V_{Dwm}$  від часу доведення суспензіями алмазного мікропорошку

АСМ 2/1 і АСМ 1/0 (див. рис. 9), вирішується зворотна задача визначення  $t_{\phi} = f(V_{Dwm})$  для досягнення заданого значення  $V_{Dwm}$  готових куль за відомого початкового значення  $V_{Dwm}$ . Наприклад, для визначення часу доведення керамічних куль  $\varnothing 12,700$  мм з  $V_4C$  (АВТ) степені точності G16 (з варіацією діаметра 0,4 мкм) за початкової варіації  $V_{Dwm} = 1,0$  мкм застосовуємо лінійну апроксимаційну модель  $t = -124,5806V_{Dwm} + 124,5815$  (див. табл. 2) і отримуємо  $t = 74,7$  год.

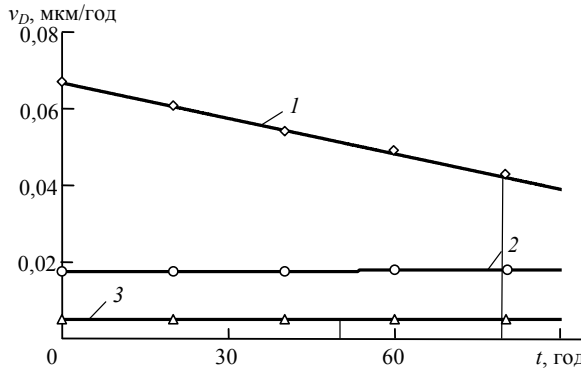


Рис. 8. Залежність швидкості змінювання діаметра куль  $v_D$  від часу доведення суспензіями АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $V_4C$  (АВТ) (2),  $Si_3N_4$  (АВТ) (3).

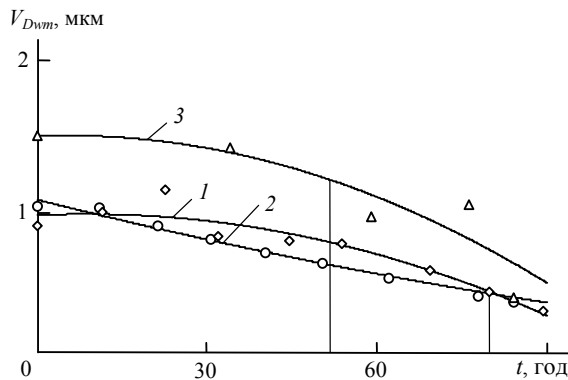


Рис. 9. Залежність середньоарифметичного значення варіації діаметра куль  $V_{Dwm}$  від часу доведення суспензіями АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $V_4C$  (АВТ) (2),  $Si_3N_4$  (АВТ) (3).

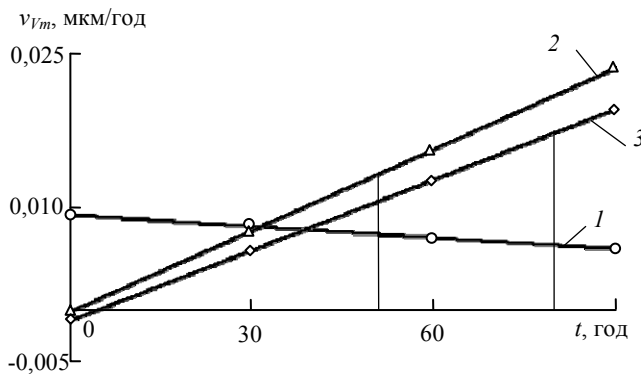


Рис. 10. Залежність швидкості змінювання варіації діаметра партій куль  $v_{Vm}$  від часу алмазного доведення суспензіями АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $V_4C$  (АВТ) (2),  $Si_3N_4$  (АВТ) (3).



**Таблиця 2. Коефіцієнти апроксимаційних моделей швидкості зменшення діаметра куль і змінювання варіації їх діаметра, часу і мінімального припуску під фінішне доведення, часу попереднього доведення куль**

Матеріал	Модель апроксимації	Показник процесу доведення				
		$v_D = f(t)$ , мкм/год	$v_{Vm} = f(t)^*$ , мкм/год	$t_{\Phi} = f(V_{Dwm})^{**}$ , год	$\Delta_{mL} = f(t_{\Phi})$ , мкм	$t_n = f(\Delta_{mL})^{***}$ , год
Доведення суспензіями ACM 28/20 і ACM 14/10						
В <sub>4</sub> С (ГП)	$y = ax+b$	$a = -0,137$ $b = 7,312$	–	–	–	–
	$y = ax^2+bx+c$	–	–	–	–	$a = 0,0013$ $b = -0,5487$ $c = 41,87$
В <sub>4</sub> С (АВТ)	$y = ax+b$	$a = -0,03$ $b = 3,986$	–	–	–	–
	$y = ax^2+bx+c$	–	–	–	–	$a = 0,0005$ $b = -0,4457$ $c = 39,57$
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (АВТ)	$y = ax+b$	$a = -0,031$ $b = 3,547$	–	–	–	–
	$y = ax^2+bx+c$	–	–	–	–	$a = 0,0024$ $b = -0,9903$ $c = 75,03$
Доведення суспензіями ACM 2/1 і ACM 1/0						
В <sub>4</sub> С (ГП)	$y = ax+b$	$a \approx 0$ $b = 0,005$	$a = 22,6 \cdot 10^{-5}$ $b = -1,0 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
	$y = ax^2+bx+c$	–	–	$a = 54,0235$ $b = -172,8457$ $c = 118,8222$	$a = 0,0001$ $b = -0,0607$ $c = 4,8507$	–
В <sub>4</sub> С (АВТ)	$y = ax+b$	$a \approx 0$ $b = 0,005$	$a = -3,7 \cdot 10^{-5}$ $b = 9,4 \cdot 10^{-3}$	–	–	–
	$y = ax^2+bx+c$	–	–	$a = 51,5521$ $b = -194,9340$ $c = 143,3918$	$a = 0,000003$ $b = -0,0181$ $c = 1,7359$	–
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (АВТ)	$y = ax+b$	$a \approx 0$ $b = 0,005$	$a = 26,3 \cdot 10^{-5}$ $b = 5,0 \cdot 10^{-5}$	–	–	–
	$y = ax^2+bx+c$	–	–	$a = -16,4342$ $b = -26,2726$ $c = 42,7068$	$a = 0,000004$ $b = -0,0046$ $c = 1,0866$	–

\* За початкової варіації діаметра  $V_{Dwm} \leq 2$  мкм.

\*\* За початкової варіації діаметра  $V_{Dwm} = 1,0$  мкм.

\*\*\* За початкового припуску  $\Delta_{mL} = 100$  мкм.

Оскільки швидкості зменшення діаметра куль і змінювання варіації їх діаметра не співпадають, мінімальний припуск  $\Delta_{mL} = f(t_{\Phi})$  на доведення суспензіями алмазного мікропорошку ACM 2/1 і ACM 1/0 визначається, спираючись на експериментальні залежності зменшення діаметра куль від часу доведення (див. рис. 7) за лінійною/нелінійною апроксимаційною моделлю. Наприклад,

для визначення мінімального припуску згаданих куль застосовуємо лінійну апроксимаційну модель  $\Delta_{mL} = -0,017749 \cdot t + 1,730637$ , розраховану на досягнення  $\Delta_{mL} = 0$  мкм за  $t = 97,5$  год. В модель підставляємо  $t = (97,5 - 74,7) = 22,8$  год і отримуємо мінімальний припуск  $\Delta_{mL} = 1,33$  мкм.

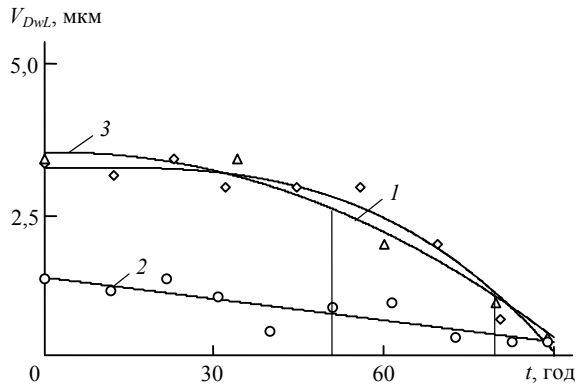


Рис. 11. Залежність різнорозмірності діаметра куль у партії  $V_{DwL}$  від часу доведенні суспензіями АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $V_4C$  (АВТ) (2),  $Si_3N_4$  (АВТ) (3).

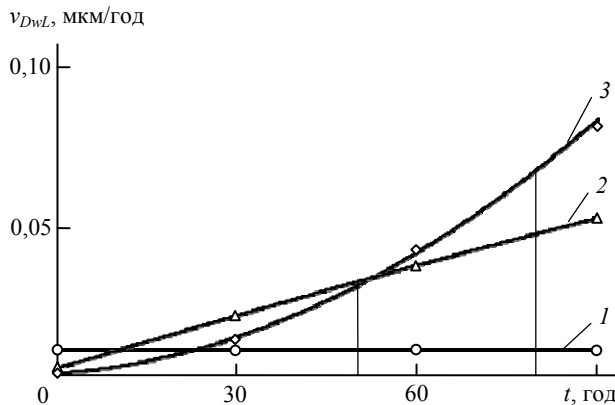


Рис. 12. Залежність швидкості змінювання різнорозмірності діаметра куль у партії  $v_{DwL}$  від часу алмазного доведення суспензіями АСМ 2/1 і АСМ 1/0 партій керамічних куль з  $V_4C$  (ГП) (1),  $V_4C$  (АВТ) (2),  $Si_3N_4$  (АВТ) (3).

Зворотна задача вирішується також для визначення часу попереднього доведення  $t_n = f(\Delta_{mL})$  суспензіями алмазного мікропорошку АСМ 28/20 і АСМ 14/10 для досягнення необхідного значення припуску під наступне фінішне доведення куль за відомого початкового значення  $\Delta_{mL}$ . У розглянутому прикладі за початкового припуску  $\Delta_{mL} = 100$  мкм підставляємо у нелінійну апроксимаційну модель  $t = 0,0005\Delta_{mL}^2 - 0,4457\Delta_{mL} + 39,57$  значення  $\Delta_{mL} = 1,3$  мкм, і отримуємо  $t = 39,0$  год.

Отже, отримані результати дозволяють визначити припуск на різних стадіях доведення куль з досліджених матеріалів залежно від заданого значення варіації їх діаметра.

## ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження закономірностей змінювання показників алмазного доведення керамічних куль з  $V_4C$  і  $Si_3N_4$ , відпо-

відальних за продуктивність і точність обробки, отримано лінійні або нелінійні апроксимаційні моделі цих показників, на основі яких розроблено методологію призначення припуску на різних стадіях доведення залежно від заданого значення варіації діаметра куль.

S. V. Sokhan', A. L. Maystrenko, A. I. Borimsky, V. V. Voznyy,  
V. G. Sorochenko, M. P. Hamaniuk, E. M. Zubaniev  
Bakul Institute for Superhard Materials,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
Changing the performance of diamond finishing  
of ceramic balls of boron carbide and silicon nitride

*The experimentally investigated patterns of changes in the diamond finishing marks of ceramic balls made of  $B_4C$  and  $Si_3N_4$ , which characterize the productivity and accuracy of machining, namely: the average diameter of the lot of balls and its variations, the different sizes of the diameter of the balls in the lot, as well as the rate of change of these indicators. As a result, linear or nonlinear approximation models of these indicators are obtained, on the basis of which a methodology has been developed for calculation of the allowance at different stages of the finishing, depending on the set value of the variation in the diameter of the balls.*

**Keywords:** ceramic balls, boron carbide, silicon nitride, diamond surface finishing, diameter of the ball and its variations, variation of ball lot diameter, approximation models, finishing allowance.

1. Гибридные подшипники SKF (с керамическими телами качения) для сложных задач. <http://www.bergab.ru/newsrss/feed261113.shtml> (дата звертання: 10.01.2020).
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. Киев, 2007. 340 с.
3. Пасічний О.О. Підвищення ефективності прецизійної алмазної обробки деталей типу "куля" з конструкційної кераміки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2002. 22 с.
4. Беженар М.П. Наукові основи спікання композитів кубічного нітриду бору при високому тиску. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ: ІНМ НАН України, 2002.
5. Стратийчук Д.А., Шульженко А.А., Олейник Г.С., Белявина Н.Н., Марків В.Я. Формирование поликристаллического карбида бора ( $B_4C$ ) с повышенной вязкостью разрушения. *Порошк. металлургия*. 2005. № 1/2. С. 90–101.
6. ISO 3290-2:2014. <https://www.iso.org/ru/standard/60133.html> (дата звертання 01.11.18).
7. Kang J., Hadfield M. The polishing process of advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine. *Proc. Institution Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manufact.* 2005. Vol. 219. P. 493–504.
8. Feng M., Wu Y., Yuan J., Ping Z. Processing of high-precision ceramic balls with a spiral V-groove plate. *Front. Mech. Eng.* 2017. Vol. 12, iss. 1. P. 132–142.
9. Zhou F., Yuan J., Lyu B. et al. Kinematics and trajectory in processing precision balls with eccentric plate and variable-radius V-groove. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2016. Vol. 84(9). P. 2167–2178.
10. 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. Mechatron. Eng.* 2015, Vol. 9, no. 5. P. 684–691.
11. Sokhan' S.V., Maystrenko A.L., Sorochenko V.H., Voznyy V.V., Borimsky A.I., Hamaniuk M.P., Zubaniev E.M. The effect of processing mode on the parameters of diamond finishing of boron carbide ceramic balls. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 2. P. 108–116
12. Гусев В.В., Калафатова Л.П. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики: монография. Донецк: ГВУЗ "ДонНТУ", 2012. 250 с.
13. 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.
14. 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 14.02.20  
Після доопрацювання 30.03.20  
Прийнята до опублікування 18.04.20