

Дослідження процесів обробки

УДК 621.9.025.77:615.46:616.728

**С. В. Сохань*, А. Л. Майстренко, В. Г. Сороченко,
В. В. Возний, О. І. Боримський, 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 доведення керамічних куль з карбіду бору

Досліджено експериментально вплив режиму обробки на процес алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору, показниками якого є швидкість знімання припуску, швидкість зменшення/збільшення відхилення від сферичної форми куль і різнорозмірність діаметра куль у партії. Для виокремлення частки конкретного показника, обумовленої саме впливом режиму обробки, застосовано метод апроксимації змінювання у часі цього показника, а зазначену частку у будь-який момент часу визначали як різницю між значеннями з дослідів і з функції апроксимації. Встановлено, що виокремлені частки можуть змінюватися як у бік зростання, так і у бік зниження в залежності від умов доведення: режиму обробки (добуток сили притиснення доводочного диска і швидкості різання), напрямку спадання діаметра куль у сепараторі відносно напрямку обертання нижнього диска й частоти подачі алмазної суспензії. Визначено найбільш ефективно для виправлення відхилення від сферичної форми і зменшення різнорозмірності діаметра куль у партії поєднання досліджуваних факторів.

Ключові слова: керамічні кулі, карбід бору, алмазне доведення, сила притиснення доводочного диска, швидкість різання, частота подачі алмазної суспензії, діаметр і відхилення від сферичної форми куль, різнорозмірність діаметра куль у партії.

ВСТУП

У багатьох галузях промисловості експлуатуються в значній кількості підшипники кочення, насоси, гідродвигуни й інші пристрої та механізми, ресурс і надійність роботи яких в основному визначається працездатністю та якістю виготовлення деталей типу “куля”. Кулі наразі виготовляють переважно зі сталі й вони відносно швидко відмовляють в умовах висо-

ких навантажень, температур, а також інтенсивних абразивного, корозійного, хімічного й інших 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.

В 1990-х роках в Україні було створено ефективні керамічні й композиційні матеріали, зокрема на основі карбїду бору, а також технології виготовлення з них прецизійних виробів типу “куля” [1, 2]. Як відомо, карбїд бору є третім за твердістю матеріалом після алмазу й кубїчного нітриду бору, і таким, що відноситься до одного з найбільш інертних хімічних з’єднань, має високу твердість, міцність й унікальну зносостійкість в агресивних й абразивних середовищах.

Прецизійними керамічними кулями комплектують гібридні або керамічні підшипники. Завдяки поєднанню унікальних властивостей підшипникових сталей і чудових властивостей кераміки забезпечуються різноманітні експлуатаційні якості гібридних підшипників – висока корозійна й термічна стійкість, стійкість проти втомного розтріскування у сталі (параметри втомної довговічності підшипників) – і, як наслідок, можливість конструювання підшипників з властивостями, які більш характерні для керамічних підшипників, ніж для підшипників, виготовлених зі звичайної підшипникової сталі (рис. 1). Ряд фірм США, Європи, Японії, КНР і Росії вже сьогодні випускають та експлуатують керамічні або гібридні підшипники кочення.

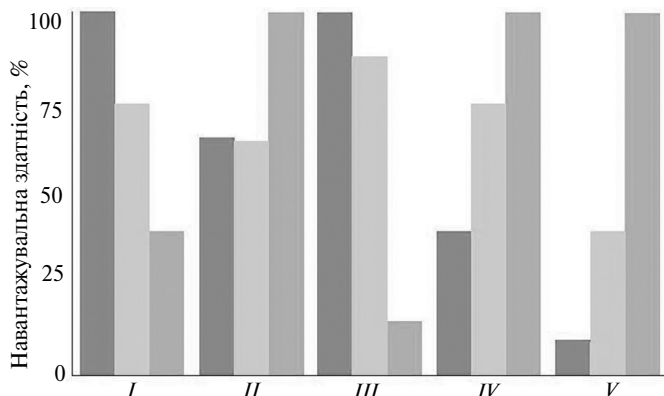


Рис. 1. Порівняння характеристик сталевих (I), гібридних (II), керамічних ZrO₂ (III), Si₃N₄ (IV), керамічних комбінованих ZrO₂/Si₃N₄ (V) підшипників [3]: статична (■), розрахункова (▨) і фактична (■) динамічна навантажувальна здатність.

Важливим стимулом для удосконалення сучасної технічної кераміки є прагнення розробити газотурбінний двигун з високим коефіцієнтом корисної дії. Необхідною умовою роботи підшипників основного валу такого двигуна є наведені далі значення показників: частота обертання валу – більше 30 000 об/хв, температура – вище за 650 °С. За температури газу понад 1100 °С використовують 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. 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 великого діаметра надзвичайно високі – для керамічних куль ступеня точності G40 (діаметром до 50 мм) відхилення від сферичної форми куль складає $\leq 1,0$ мкм, варіація діаметра кулі – $\leq 1,0$ мкм, різнорозмірність діаметра куль у партії – $\leq 2,0$ мкм, а якість виготовлення по параметру шорсткості поверхні виробів $Ra \leq 0,06$ мкм [4]. Вказані вимоги забезпечуються груповою алмазно-абразивною обробкою у декілька переходів. Головний недолік існуючих технологій – низька продуктивність обробки прецизійних керамічних куль.

Групова абразивна обробка куль між дисками-притирами є найбільш універсальною операцією формоутворення прецизійних куль і по цей час привертає увагу дослідників [5–8]. Під час масового виробництва сталевих чи керамічних куль за так званої “елеваторної” схеми доведення кулі постійно перемішуються в бункері перед подачею в робочу зону між дисками у одну (спірально) або кілька (кільцевих) канавок кочення у нижньому диска, а після циклу обробки автоматично скидаються у бункер. На відміну від масового дрібносерійного або дослідного виробництва оброблювані кулі перекочуються між дисками однією канавкою і без перемішування. При цьому кількість одночасно оброблюваних куль обмежена місткістю канавки.

Процес алмазного шліфування або доведення керамічних виробів, зокрема з карбїду бору, як і будь-якого крихкого неметалевого матеріалу, докорінно відрізняється від процесу алмазного шліфування металів [9–13]. Тут мають місце пружно-пластична деформація без руйнування, диспергування частинок матеріалу припуску при пластичній деформації і крихке руйнування матеріалу зі сколюванням часток. 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) [13, 14]. В табл. 1 наведено ранжування керамічних матеріалів за критичними показниками тріщиноутворення під час алмазно-абразивної обробки, яке ґрунтується на їхніх фізико-механічних властивостях.

Зважаючи на такі особливості процесу алмазного доведення куль з кераміки, метою дослідження було вивчення закономірностей впливу режиму обробки на процес алмазного доведення керамічних куль з карбїду бору, який характеризували такими показниками, як швидкість зменшення діаметра куль, швидкість змінювання форми поверхні куль й різнорозмірність діаметра куль у партії.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Алмазне доведення керамічних куль з гарячепресованого карбїду бору здійснювали на модернізованому доводочному верстаті мод. 3E-814 між верхнім нерухомим і нижнім рухомим доводочними дисками. Для регулювання частоти обертання нижнього диска верстат був додатково оснащений перетворювачем частоти електричного струму. Під час обробки кулі, розділені сепаратором (рис. 2), утримувалися кільцевою канавкою нижнього диска, яка мала V-подібний профіль, а їх кількість становила 20 шт. Використовували суспензію алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 14/10 на основі масла індустріального И-20А.

Перед проведенням дослідів показники точності партії куль мали наступні значення: середній діаметр куль у партії $D_{wml} = 41,257$ мм (тут і далі позначення згідно ISO 3290-2:2014), різномірність діаметра куль у партії $V_{DwL} = 12$ мкм. Крім того для оцінювання загальної тенденції змінювання відхилення від сферичної форми у партії куль саме під час прецизійного алмазного доведення введено ненормований стандартом показник t_{DwL} , обрахований як середнє значення відхилень від сферичної форми t_{Dw} куль у партії. Перед проведенням дослідів $t_{DwL} = 4,2$ мкм.

Таблиця 1. Деякі фізико-механічні властивості керамічних матеріалів, отриманих методом гарячого пресування або реакційного спікання, та їхнє ранжування за критичними показниками тріщиноутворення [15]

Показник	Типи керамічних матеріалів				
	В ₄ С (ГП)	SiC (РС)	Al ₂ O ₃ (ГП)	Si ₃ N ₄ (ГП)	ZrO ₂
Густина, 10 ⁻³ кг/м ³	2,48–2,52	3,12	3,90	3,10	5,95
Модуль пружності, ГПа	420–430	413	365	310	205
Мікротвердість H_{μ} , ГПа	22,0–25,0	20,0	14,9	13,9	11,0
Границя міцності під час згинання R_{bm} , МПа	230	210–230	370	930	690
Індекс крихкості H_{μ}/K_{Ic}	6,29–6,41	4,35	3,55	3,23	2,50
Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень І типу K_{Ic} , МПа·м ^{-1/2}	3,5–3,9	4,6	4,2	4,3	4,4
Ранжування за критичним значенням сили для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі	0,05	0,18	0,32	0,45	1,00
Ранжування за критичною довжиною медіанної тріщини, при якому вона починає стало розвиватися при індентуванні	0,15	0,35	0,47	0,59	1,00

Примітка. ГП – гарячепресований, РС – реакційно спечений.



Рис. 2. Керамічні кулі у сепараторі на нижньому притирі верстата мод. 3Е-814.

Вивчали вплив таких складових режиму обробки, як сила P_d притиснення доводочного диска і швидкість різання v , а також вплив схеми розташування куль у сепараторі відносно напрямку обертання нижнього диска і частоти подачі алмазної суспензії на швидкість знімання припуску $v_d = \Delta d/t$ (швидкість зменшення діаметра кулі), швидкість змінювання форми поверхні куль $v_s = \Delta\delta/t$ (швидкість зменшення або збільшення відхилення від сферичної форми) і швидкість змінювання різнорозмірності діаметра куль у партії Δd_p . Вказані показники процесу обраховували після безпосереднього вимірювання на кожній кулі її діаметра й відхилення від сферичної форми до і після проведення дослідю.

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} і середній діаметр партії куль D_{wml} до і після обробки. Значення різнорозмірності діаметра куль у партії V_{DwL} визначали згідно стандарту як різницю між середніми діаметрами найбільшої і найменшої кулі у партії.

Вимірювання відхилення від сферичної форми кулі t_{Dw} (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 поділки шкали вимірювань 1 мкм, закріпленим на магнітному штативі. Вимірювану кулю розташовували на установочному кільці з внутрішньою фаскою, щоб максимально наблизитися до умов контакту кулі й кільця по окружності. Діаметр отвору кільця обирали як діаметр окружності, вписаної у рівносторонній трикутник, який у свою чергу є вписаним у окружність, діаметр якої дорівнює максимальному діаметра кулі. В результаті вимірювань при повороті кулі на установочному кільці знаходили максимальне й мінімальне значення відхилення від сферичної форми кулі, різницю між якими приймали за відхилення від сферичної форми кулі t_{Dw} , й обраховували середнє відхилення від сферичної форми куль у партії t_{DwL} до і після обробки.

Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [16], під час обрахунку середніх значень показників, що вимірювалися – діаметра і відхилення від сферичної форми куль, останні перевірялися 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, то найкращою оцінкою дисперсії відтворюваності вважали середньозважену дисперсію

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

Оскільки досліджувані показники процесу доведення є розрахунковими величинами, які базуються кожного разу на вимірюванні вказаних у методиці досліджень геометричних показників, дисперсію відтворюваності для них обраховували як середньозважену дисперсію дисперсій вибірок, приведену до розмірності розрахункової величини (тобто мкм/год):

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

де $k = 36$.

Далі за значеннями D_{wml} , V_{DwL} й t_{DwL} (вихідними й після проведення дослідів) будували графіки змінювання цих характеристик у загальному часі проведення дослідю у вигляді сукупності дискретних точок і виокремлювали

саме 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 доведення і даного часу обробки. Зазначена тенденція обумовлена на погляд авторів, по-перше, поступовим переходом від обробки поверхневого шару, послабленого дефектами спікання і попередньої алмазно-абразивної обробки, до обробки власне основного матеріалу й пов'язаним з цим підвищенням спротиву оброблюваного матеріалу руйнуванню. Оскільки кочення кулі під дією сил тертя-зчеплення з дисками й різання є саморегульованим процесом, останній відбувається з пониженою кутовою швидкістю і, як наслідок, зменшується окружна подача доведення. По-друге, вказана тенденція обумовлена одночасним монотонним збільшенням частки часу обробки саме основного матеріалу у загальному часі проведення дослідів.

Для виокремлення впливу режиму обробки використали метод апроксимації вказаних залежностей у вигляді сукупностей дискретних точок D_{wml} , V_{DwL} й t_{DwL} монотонними безперервними функціями у часі [15]. Наслідком впливу режиму обробки у досліді вважали різницю між зміною обрахованого з дослідів значення кожного показника (Δd , Δd_n і $\Delta \delta$) і 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.

На першому етапі для вивчення змінюваності досліджуваних показників процесу було вибрано повний факторний експеримент типу 2^3 [16]. Фактори, які варіювалися, вибирали наступним чином. По-перше, досліджували вплив наступних складових режиму обробки – сили притиснення доводочного диска P_n в діапазоні 50–150 Н і частоти обертання нижнього диска в діапазоні 18–45 об/хв (діапазон частоти струму був 20–50 Гц), яка забезпечувала швидкість різання v (лінійну швидкість між поверхнями кулі й диска) в діапазоні 0,5–1,2 м/с. Фактором, який варіювався, був добуток $P_n v$, пропорційний потужності різання, у відносних одиницях. За сили $P_n = 50$ і 150 Н та відповідно швидкості $v = 1,2$ м/с (45 об/хв) і 0,5 м/с (18 об/хв) значення фактора становило $\frac{50}{50} \times \frac{1,2}{1,2} = 1,0$ на мінімальному рівні й $\frac{150}{50} \times \frac{0,5}{1,2} = 1,25$ на максимальному рівні.

По-друге, вивчали вплив схеми розташування куль у сепараторі відносно напрямку обертання нижнього диска, для чого було здійснено ранжування куль за спаданням значення середнього діаметра D_{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. Фактором, який варіювався, був напрямок N_d спадання діаметра по відношенню до напрямку обертання. За максимальний рівень варіації досліджуваного фактора вважали умову спадання діаметра куль “за” напрямком обертання, а за мінімальний – умову “проти” напрямку обертання.

По-третє, досліджували вплив частоти подачі алмазної суспензії: максимальний рівень варіації фактора мали за умови $n_c = 1 \text{ год}^{-1}$, а мінімальний – за умови $n_c = 1/1,5 = 2/3 \text{ год}^{-1}$. Час проведення кожного дослідів становив 6 год.

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

На другому етапі запланували однофакторний експеримент з дослідження впливу режиму обробки (добутку $P_{п,ν}$), який, окрім згаданих значень (1,0 і 1,25), встановлювали на рівнях $\frac{200}{50} \times \frac{0,25}{1,2} = 0,83$, $\frac{200}{50} \times \frac{0,5}{1,2} = 1,67$ і

$$\frac{100}{50} \times \frac{0,25}{1,2} = 0,42 \text{ за незмінних рівнів інших факторів, тобто спадання діаметра}$$

куль за напрямком обертання й часу обробки куль між подачами суспензії $t_0 = 60$ хв. Крім того на другому етапі досліди проводили в такій послідовності змінювання $P_{п,ν}$: 1,25, 1,00, 0,83, 1,67 і 0,42 за незмінних максимальних значень N_d і t_0 .

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На першому етапі досліджень отримали експериментальні дані змінювання діаметра кулі в залежності від часу обробки t , аналіз яких показав тенденцію до монотонного спадання діаметра з часом обробки з практично постійним темпом спадання. Тому це змінювання діаметра доцільно апроксимувати лінійною функцією (рис. 3, а). В той же час експериментальні дані змінювання відхилення від сферичної форми від часу обробки й різномірності діаметра куль у партії з часом обробки свідчать про нелінійний характер спадання цих показників (див. рис. 3, б і в), і тому їх доцільно апроксимувати нелінійними функціями (в обох випадках – другого порядку).

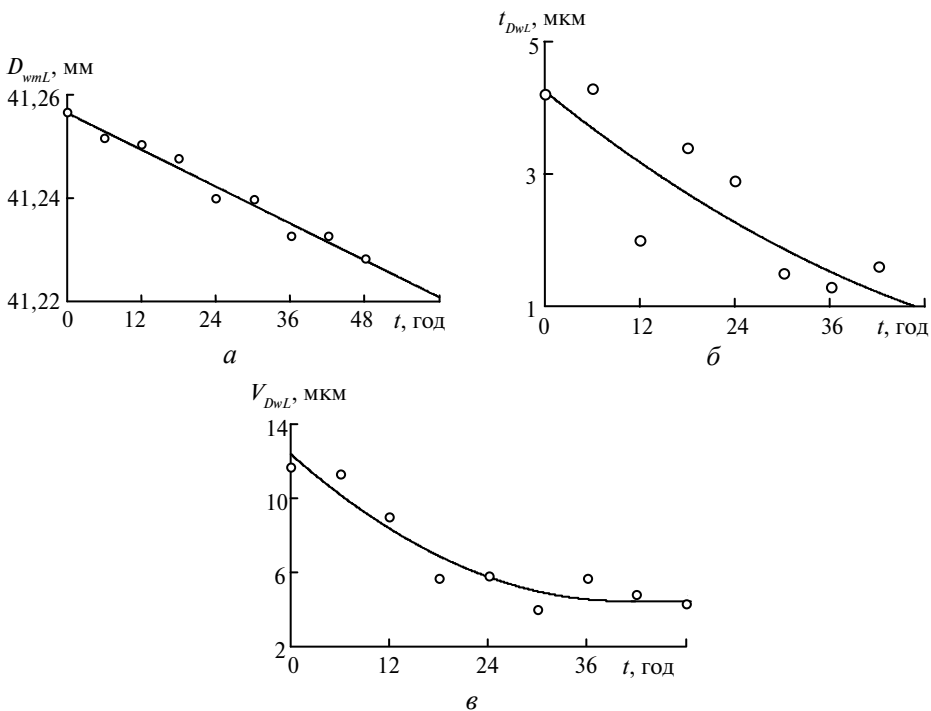


Рис. 3. Змінювання середнього діаметра D_{wmL} партії куль (а), середнього відхилення t_{DwL} від сферичної форми куль у партії (б) і різномірності діаметра V_{DwL} куль у партії (в) на першому етапі досліджень.

Для визначення тієї складової показників Δd , $\Delta d_{п}$ і $\Delta \delta$, змінювання якої залежить від впливу режиму обробки, застосовано метод апроксимації зміню-

вання у часі цього показника, а зазначену частку у будь-який момент часу визначали як різницю між значеннями з досліду і апроксимаційної функції. В табл. 2 додатне чи від'ємне значення відповідних складових A_3 , змінювання яких залежить від впливу режиму обробки, отримано в результаті віднімання апроксимованих значень A_2 від їх поточних значень A_1 у досліді. Від'ємне значення A_1 у досліді означає, що вимірюваний показник в результаті проведення досліду збільшується, відповідно від'ємне значення A_3 означає, що вплив режиму обробки призводить до зменшення поточного значення вимірюваного у досліді показника відносно апроксимованого значення.

Таблиця 2. Матриця змінювання факторів у абсолютних величинах, значення досліджуваних показників процесу на першому етапі досліджень

P_{nv}	N_d	n_c	Δd , МКМ			v_d , МКМ/ГОД	$\Delta \delta$, МКМ			v_δ , МКМ/ГОД	Δd_n , МКМ			$v_{\Delta d}$, МКМ/ГОД
			A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3	
1,0	проти	2/3	4,9	3,6	1,3	0,22	-0,08	0,52	-0,60	-0,10	0,33	2,19	-1,86	-0,31
1,25	проти	2/3	1,2	3,6	-2,4	-0,39	2,29	0,49	1,80	0,30	2,33	1,84	0,49	0,08
1,0	за	2/3	2,8	3,6	-0,8	-0,13	-1,44	0,46	-1,90	-0,32	3,33	1,48	1,85	0,31
1,25	за	2/3	7,7	3,6	4,1	0,69	0,57	0,43	0,14	0,02	-0,17	1,13	-1,30	-0,22
1,0	проти	1	0,2	3,6	-3,4	-0,56	1,33	0,40	0,93	0,16	1,83	0,78	1,05	0,18
1,25	проти	1	7,0	3,6	3,4	0,57	0,24	0,37	-0,13	-0,02	-1,67	0,43	-2,10	-0,35
1,0	за	1	2,5	3,6	-1,1	-0,18	-0,84	0,34	-1,18	-0,20	-0,83	0,08	-0,92	-0,15
1,25	за	1	4,4	3,6	0,8	0,13	0,57	0,31	0,26	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00

Примітка. A_1 , A_2 і A_3 – значення Δd , $\Delta \delta$, Δd_n , які отримано відповідно з досліду, з функції апроксимації і як різницю перших двох.

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

$$v_d = 0,0439 + 0,2061x_1 + 0,0839x_2 - 0,0523x_3 + 0,0752x_1x_2 + 0,1550x_1x_3 - 0,0998x_2x_3 - 0,2814x_1x_2x_3;$$

$$v_\delta = -0,0139 + 0,1000x_1 - 0,0975x_2 + 0,0091x_3 + 0,0449x_1x_2 - 0,0844x_1x_3 + 0,0258x_2x_3 + 0,0595x_1x_2x_3;$$

$$v_{\Delta d} = -0,0576 - 0,0633x_1 + 0,0427x_2 - 0,0240x_3 - 0,0299x_1x_2 - 0,0299x_1x_3 - 0,0373x_2x_3 + 0,1992x_1x_2x_3.$$

Статистичну значимість коефіцієнтів рівнянь регресії перевіряли за критерієм Стьюдента: модель v_d має всі сім статистично значимих коефіцієнтів, v_δ – п'ять статистично значимих коефіцієнтів (крім b_3 і b_6) і $v_{\Delta d}$ – два статистично значимих коефіцієнта (крім b_2 – b_6).

Результати перевірки адекватності отриманих рівнянь регресії результатам експериментів за критерієм Фішера наведено в табл. 3.

З урахуванням результатів перевірки отримано наступні моделі змінних процесу, адекватні вихідним даним:

$$v_d = 0,0439 + 0,2061x_1 + 0,0839x_2 - 0,0523x_3 + 0,0752x_1x_2 + 0,1550x_1x_3 - 0,0998x_2x_3 - 0,2814x_1x_2x_3;$$

$$v_8 = -0,0139 + 0,1000x_1 - 0,0975x_2 + 0,0449x_1x_2 - 0,0844x_1x_3 + 0,0595x_1x_2x_3;$$

$$v_{\Delta d} = -0,0576 - 0,0633x_1 + 0,1992x_1x_2x_3.$$

Таблиця 3. Перевірка адекватності рівнянь регресії результатам дослідів

Показник	V_d	V_8	$V_{\Delta d}$
Дисперсія відтворюваності $S_{\text{відтв}}^2$, мкм ²	0,075	0,068	0,156
Дисперсія адекватності $S_{\text{ад}}^2$, мкм ² /год ²	0,000	0,030	0,223
Розрахований F -критерій Фішера $f = S_{\text{ад}}^2 / S_{\text{відтв}}^2$	0,000	0,444	1,430
Табличний F -критерій Фішера для $p = 0,05$ і чисел ступенів свободи $f_{\text{ад}} = (N - 1)$, $f_{\text{відтв}} = N(m - 1)$	3,900 ($f_{\text{ад}} = 1$, $f_{\text{відтв}} = 152$)	2,660 ($f_{\text{ад}} = 3$, $f_{\text{відтв}} = 152$)	2,160 ($f_{\text{ад}} = 6$, $f_{\text{відтв}} = 152$)

На другому етапі досліджень змінювання D_{wml} , t_{DwL} і V_{DwL} в залежності від часу обробки t апроксимували лінійними функціями (рис. 4). Для визначення тієї складової вищевказаних показників процесу, змінювання якої не залежить від впливу режиму обробки, також застосовано метод графічної апроксимації (табл. 4).

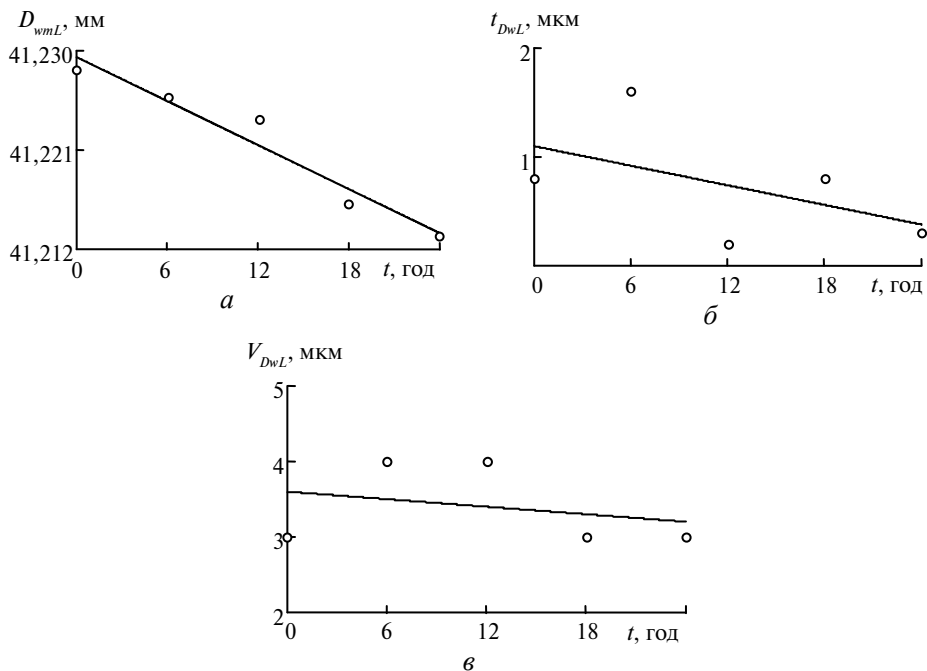


Рис. 4. Змінювання середнього діаметра партії куль D_{wml} (а), середнього відхилення від сферичної форми куль у партії t_{DwL} (б) і різномірності діаметра куль у партії V_{DwL} (е) на другому етапі досліджень.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Оскільки в процесі алмазного доведення будь-яких прецизійних куль, у тому числі з карбіду бору, прагнуть досягти в першу чергу максимально мо-

жливого виправлення відхилення від сферичної форми куль, а також зменшити різномірність діаметра куль у партії, і лише в другу чергу досягти прийнятної продуктивності обробки, саме з такої точки зору слід визначати вплив досліджуваних факторів на показники алмазного доведення керамічних куль.

Таблиця 4. Матриця змінювання факторів у абсолютних величинах і значення досліджуваних показників процесу на другому етапі досліджень

$P_{пв}$	N_d	n_c	Δd , МКМ			v_d , МКМ/ГОД	$\Delta \delta$, МКМ			v_{δ} , МКМ/ГОД	$\Delta d_{п}$, МКМ			$v_{\Delta d}$, МКМ/ГОД
			A ₁	A ₂	A ₃		A ₁	A ₂	A ₃		A ₁	A ₂	A ₃	
1,25	за	1	4,4	4,0	0,4	0,07	0,78	0,18	0,33	0,06	4,3	0,3	2,1	0,35
1,00	за	1	2,5	4,0	-1,5	-0,25	-0,33	0,18	-0,96	-0,16	4,8	0,3	-0,8	-0,13
0,83	за	1	2,0	4,0	-2,0	-0,33	1,44	0,18	1,26	0,21	0,8	0,3	0,5	0,08
1,67	за	1	7,7	4,0	3,7	0,62	-0,63	0,18	-0,80	-0,13	0,2	0,3	-0,1	-0,02
0,42	за	1	2,9	4,0	-1,1	-0,18	0,56	0,18	0,38	0,06	0,5	0,3	0,2	0,03

Примітка. A₁, A₂ і A₃ – значення Δd , $\Delta \delta$, $\Delta d_{п}$, отримані відповідно з дослідів, з функції апроксимації і як різницю перших двох.

Як видно з отриманих рівнянь регресії, найбільший вплив на швидкість $v_{\Delta d}$ чинить взаємодія усіх трьох факторів (коефіцієнт впливу – 0,2). Вплив режиму обробки є в ~ 3 рази меншим. Найбільші значення $v_{\Delta d}$ досягаються за одночасного підвищення N_d і n_c , а значення $P_{пв}$ має бути мінімальним (рис. 5, а).

У порядку зменшення впливу на швидкість v_{δ} досліджувані фактори ранжуються таким чином: режим обробки й схема розташування куль (коефіцієнти впливу – по 0,1), взаємодія режиму обробки й частоти подачі алмазної суспензії (коефіцієнт впливу – 0,08), взаємодія всіх трьох факторів (коефіцієнт впливу – 0,06), взаємодія режиму обробки й схеми розташування куль (коефіцієнт впливу – 0,04). Найбільше значення v_{δ} досягається зі збільшенням режиму обробки за мінімального рівня N_d і n_c (див. рис. 5, б).

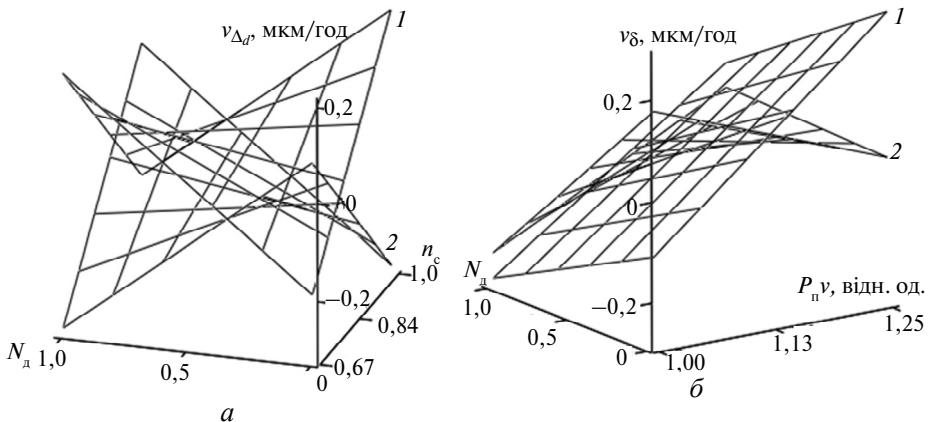


Рис. 5. Залежність показників процесу алмазного доведення від впливу досліджуваних факторів: $v_{\Delta d}$ (а) – за мінімального (1) і максимального (2) значення $P_{пв}$; v_{δ} (б) – за мінімального (1) і максимального (2) значення n_c .

Оскільки режим обробки має більший позитивний вплив на v_{δ} ніж негативний на $v_{\Delta d}$ (значення коефіцієнтів його впливу 0,1 проти $\sim 0,06$), а схема

розташування куль і частота подачі алмазної суспензії – позитивний вплив на $v_{\Delta d}$ і негативний на v_{δ} , дослідження на другому етапі впливу режиму обробки за незмінних максимальних значень N_d і n_c мало показати діапазон змінювання $P_{пv}$, прийнятний для одночасного зменшення і відхилення від сферичної форми куль, і різнорозмірності діаметра куль у партії.

Додатні значення показників v_{δ} і $v_{\Delta d}$ зберігаються в діапазоні змінювання $P_{пv}$ від 0,4 до 1,1 з максимальним значенням v_{δ} при $P_{пv} \approx 0,45$, а $v_{\Delta d}$ – при $P_{пv} = 1,1$ (рис. 6). Отже в залежності від поставленої задачі – першочергове зменшення відхилення від сферичної форми куль чи різнорозмірності діаметра куль у партії – слід призначати режим обробки $P_{пv} \rightarrow 0,45$, або $P_{пv} \rightarrow 1,1$ за незмінних максимальних значень N_d і n_c . Рівність значень показників v_{δ} і $v_{\Delta d}$ досягається за умови $P_{пv} \rightarrow 1,1$.

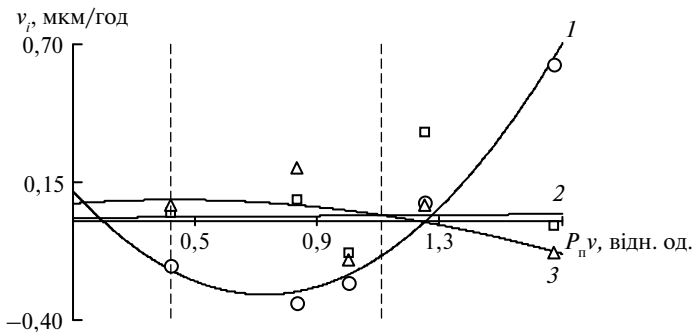


Рис. 6. Залежність показників процесу алмазного доведення від впливу режиму обробки: v_d (1), v_{δ} (2) і $v_{\Delta d}$ (3).

ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження впливу режиму обробки та інших параметрів процесу алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору на його ефективність визначено діапазон змінювання режиму обробки (0,4–1,1), найбільш прийнятний для одночасного зменшення і відхилення від сферичної форми куль і різнорозмірності діаметра куль у кожній партії. Залежно від поставленої задачі – першочергового зменшення відхилення від сферичної форми куль чи різнорозмірності діаметра куль у партії – слід призначати режим обробки $P_{пv} \rightarrow 0,45$, або $P_{пv} \rightarrow 1,1$ за умови спадання діаметра куль у сепараторі за напрямком обертання нижнього диска й частоти подачі алмазної суспензії 1 год⁻¹.

S. V. Sokhan¹, A. L. Maystrenko, V. H. Sorochenko, V. V. Voznyy,
A. I. Borimsky, M. P. Hamaniuk, E. M. Zubaniev
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
The influence of the processing mode on the parameters
of diamond finishing of ceramic balls made of boron carbide

We investigated experimentally an influence of the machining mode on diamond surface finishing ceramic balls from boron carbide. The indicators of machining are rate of work removal parameter, rate of decrease/increase in deviation from spherical form of the ball and variation of ball lot diameter. We allocated the share in the indicators that actually

depended on the effect of the factor of machining conditions. For this, we applied the method of approximation for the change in time of the indicators and the indicated share at any time was determined as the difference between the values from the experiment and the approximation function. 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 factor machining conditions (the product of pressing force of the lap and cutting speed), the direction of falling of the diameter of the balls in the separator relative to the direction of rotation of the lower disk and frequency of feed of diamond paste. As a result, we ascertained the best effective combination of tendencies of parameter's change for decrease of non-circularity of ball and variation of ball lot diameter.

Keywords: ceramic balls, boron carbide, diamond surface finishing, pressing force of the lap, cutting speed, diamond feed rate, diameter and deviation from spherical form of the ball, variation of ball lot diameter.

С. В. Сохань*, А. Л. Майстренко, В. Г. Сороченко, В. В. Возный,
А. И. Боримский, М. П. Гаманюк, Е. Н. Зубанев
Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля
НАН Украины, г. Киев, Украина
Влияние режима обработки на показатели алмазной доводки
керамических шаров из карбида бора

Исследовано экспериментально влияние режима обработки на процесс алмазной доводки керамических шаров из карбида бора, показателями которого являются: скорость съема припуска, скорость уменьшения/увеличения отклонения от сферической формы шаров и разноразмерность диаметра шаров в партии. Для выделения доли конкретного показателя, обусловленной влиянием именно режима обработки, применен метод аппроксимации изменения во времени этого показателя, а указанную долю в любой момент времени определяли, как разность между значениями из опыта и функции аппроксимации. Установлено, что выделенные доли могут изменяться как в сторону увеличения, так и уменьшения в зависимости от условий доводки: режима обработки (произведения силы прижима доводочного диска на скорость резания), направления спадания диаметра шаров в сепараторе относительно направления вращения нижнего диска и частоты подачи алмазной суспензии. Определено наиболее эффективное для исправления отклонения от сферической формы и уменьшения разноразмерности диаметров шаров в партии сочетание исследуемых факторов.

Ключевые слова: керамические шары, карбид бора, алмазная доводка, сила прижима доводочного диска, скорость резания, частота подачи алмазной суспензии, диаметр и отклонение от сферической формы шаров, разноразмерность диаметра шаров в партии.

1. 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.
2. Пасічний О.О. Підвищення ефективності прецизійної алмазної обробки деталей типу "куля" з конструкційної кераміки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2002. 22 с.
3. Керамика FRIALIT®-DEGUSSIT® http://www.aliaxis-ui.ru/u/documents/frialit_degussit_ceram_podshipnic.pdf (дата звертання: 01.11.18).
4. ISO 3290-2:2014. <https://www.iso.org/ru/standard/60133.html> (дата звертання 01.11.18).
5. Kang J., Hadfield M. The polishing process of advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine. *Proc. Institution Mechanical Engineers, Part B: J. Eng. Manufact.* 2005. Vol. 219. P. 493–504.
6. Feng M., Wu Y., Yuan J., Ping Z. Processing of high-precision ceramic balls with a spiral V-groove plate. *Front. Mech. Eng.* 2017, 12(1). P. 132–142.
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. Lvu C.C., Sun Y.L. and 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.
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., Лицкендорф 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., Ильницкая Г.Д., Кабьшош 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 связей и для полирования. *Сверхтв. материалы.* 2014. № 1. С. 14–26.
11. 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.
12. Filatov Yu.D., Filatov O.Yu., Monteil G., Heisel U., Storchak M. Bound-abrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials. *Proc. SPIE.* 2010. Vol. 7786, art. 778613.
13. Гусев В.В., Калафатова Л.П. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики: монография. Донецк: ГВУЗ “ДонНТУ”, 2012. 250 с.
14. 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.
15. 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.
16. 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 27.11.18

Після доопрацювання 18.04.19

Прийнята до опублікування 06.05.19