

С.В. Сохань, д.т.н., пров.н.с.
В.В. Возний, к.т.н., с.н.с.
В.Г. Сороченко, к.т.н., с.н.с.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України

Алмазне доведення керамічних куль з карбиду бору

Експериментально досліджено вплив режиму обробки на процес алмазного доведення керамічних куль з карбиду бору, показниками якого є швидкість знімання припуску, швидкості зменшення/збільшення відхилення від сферичної форми куль і різнорозмірності діаметра куль у партії. Для виокремлення частки, обумовленої саме впливом режиму обробки, застосовано метод графічної апроксимації змінювання у часі середніх значень показників точності у партії куль. Встановлено, що виокремлені частки можуть змінюватися як у бік зростання, так і у бік зниження залежно від значень параметрів режиму обробки, як-от: сила притиснення довідного диска, час обробки куль між подачею алмазної суспензії і основа алмазної суспензії (масло або вода). В результаті проведення повного факторного експерименту типу 2^3 визначено найбільш ефективне для виправлення відхилення від сферичної форми і зменшення різнорозмірності діаметра куль у партії поєднання досліджуваних факторів.

Ключові слова: керамічні кулі з карбиду бору; алмазне доведення; сила притиснення довідного диска; час обробки куль між подачею суспензії; основа алмазної суспензії; діаметр і відхилення від сферичної форми куль; різнорозмірність діаметра куль у партії.

Актуальність теми. У багатьох галузях промисловості експлуатуються в значній кількості підшипники кочення, насоси, гідродвигуни й інші пристрої і механізми, ресурс і надійність роботи яких в основному визначається працездатністю та якістю виготовлення деталей типу «куля». Кулі в цей час переважно виготовляються зі сталі й вони відносно швидко відмовляють в умовах високих навантажень, температур, а також інтенсивних 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.

У 1990-х роках в Україні були створені ефективні керамічні й композиційні матеріали, зокрема на основі карбиду бору, а також технології виготовлення з них прецизійних виробів типу «куля» [1–2]. Як відомо, карбід бору є третім за твердістю матеріалом після алмазу й кубічного нітриду бору, і таким, що належить до одного із найбільш інертних хімічних з'єднань, має високу твердість, міцність й унікальну зносостійкість у агресивних й абразивних середовищах. Завдяки поєднанню унікальних властивостей підшипникових сталей та чудових властивостей кераміки забезпечуються різноманітні високі експлуатаційні якості гібридних підшипників – висока корозійна й термічна стійкість (аж до температури 450 °С), стійкість проти втомного тріщиноутворення 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 [3]. Ряд фірм США, Європи, Японії, КНР та Росії вже сьогодні випускає та експлуатує керамічні або гібридні підшипники кочення.

Важливим стимулом для удосконалення сучасної технічної кераміки є прагнення розробити газотурбінний двигун з високим коефіцієнтом корисної дії. Умови роботи підшипників основного вала таких двигунів – частота обертання вала більше 30 000 об/хв і температура вище за 650 °С. При температурі газу понад 1100 °С використовуються тільки керамічні матеріали з більшою температурною стійкістю порівняно 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. Вимоги до точності і якості виготовлення прецизійних керамічних куль великого діаметра надзвичайно високі – для керамічних куль степені точності G40 (діаметром до 50 мм) відхилення від сферичної форми куль $\leq 1,0$ 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 стадій. Головний недолік існуючих технологій – низька продуктивність обробки прецизійних керамічних куль.

Сучасний рівень досліджень. Групова абразивна обробка куль між обертовими дисками є найбільш універсальною операцією виробництва куль і дотепер привертає увагу дослідників [5–8]. На відміну від масового виробництва сталевих куль, де застосовують так звану «елеваторну» обробку з постійним перемішуванням куль у бункері перед подачею в робочу зону у кілька доріжок кочення між двома

обертними дисками, керамічні кулі при шліфуванні або доведенні перекочуються уздовж доріжок кочення між обертними дисками без автоматичного перемішування. При цьому кількість одночасно оброблюваних куль обмежена їх розміщуваністю на доріжках нижнього диска.

Процес алмазного шліфування або доведення керамічних виробів, зокрема з карбіду бору, як і будь-якого крихкого неметалевого матеріалу, докорінно відрізняється від процесу алмазного шліфування металів [9-10]. Тут мають місце пружно-пластична деформація без руйнування, диспергування кластерів матеріалу під час його пластичної деформації і крихке руйнування зі сколюванням частинок. Характерним результатом знімання припуску під час абразивної обробки є бічні відколи й вириви кластерів з поверхневого шару, що проявляються у вигляді осередків руйнування, які найбільше впливають на формування шорсткості поверхневого шару. Імовірність тих або інших механізмів руйнування припуску визначається як фізико-механічними властивостями матеріалу, так і навантаженням на зерна абразиву (залежно від режимів обробки) [10]. В таблиці 1 наведено порівняння схильності матеріалів до тріщиноутворення під час алмазно-абразивної обробки.

Таблиця 1

Деякі фізико-механічні властивості керамічних матеріалів, отриманих методом гарячого пресування або реакційного спікання, їх ранжування за схильністю до тріщиноутворення [11]

Показник	Типи керамічних матеріалів				
	В ₄ С (Гп)	ZrO ₂	Si ₃ N ₄ (Гп)	Al ₂ O ₃ (Гп)	SiC (Рс)
Густина, кг/м ³ ×10 ⁻⁶	2,48–2,52	5,95	3,10	3,90	3,12
Модуль пружності, ГПа	420–430	205	310	365	413
Мікротвердість H _μ , ГПа	22,0–25,0	11,0	13,9	14,9	20,0
Індекс крихкості H _μ /K _{1c}	6,29–6,41	2,50	3,23	3,55	4,35
Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень I типу K _{1c} , Па·м ^{-1/2} ×10 ⁶	3,5–3,9	4,4	4,3	4,2	4,6
Ранжування за критичним значенням сили для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі	0,05	1,00	0,45	0,32	0,18
Ранжування за критичною довжиною медіанної тріщини, при якому вона починає стало розвиватися при інденуванні	0,15	1,00	0,59	0,47	0,35

Вважається [10], 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 виколі, і відповідно у стільки ж разів менша глибина різання, що потрібна для утворення виколів. З іншого боку, при однаковій глибині різання виколі на обробленій поверхні керамічного матеріалу мають бути тим більшими, чим меншим є критичне значення сили, необхідної для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі. Критичне значення довжини медіанної тріщини, при якому вона починає стало розвиватися при інденуванні, є показником глибини зруйнованого шару на обробленій поверхні.

Метою статті є вивчення впливу режиму обробки на процес алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору, який характеризували такими показниками, як швидкість зменшення діаметра кулі, швидкість змінювання форми поверхні кулі та швидкість змінювання різномірності діаметра куль у партії.

Методика досліджень. Дослідження впливу режиму обробки на процес алмазного доведення керамічних куль з гарячепресованого карбіду бору проводили на модернізованому доводочному верстаті мод. 3E-814, в якому між верхнім і нижнім доводочними дисками було розміщено сепаратор (рис. 1). Верхній диск не обертася. Частота обертання нижнього диску з V-подібними кільцевими канавками для розміщення куль становила 30 об/хв. Кількість куль у партії, що оброблювалися одночасно, складала 15 шт. Використовували суспензію алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 28/20 на водній або масляній основі. Початкова підготовка куль до проведення дослідів – середній діаметр партії куль $D_{wml} = 42,97$ мм, середнє відхилення від сферичної форми куль у партії $\Delta_{RSwL} = 2,1$ мкм, різномірність діаметра куль у партії $V_{DwL} = 49$ мкм.

Вивчали вплив таких параметрів режиму обробки, як сила P_d притиснення доводочного диску, час t_o обробки куль між подачами алмазної суспензії і основа алмазної суспензії (масло або вода) 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) та швидкість змінювання різномірності діаметра куль у партії Δd_n .



Рис. 1. Робоча зона верстата мод. 3E-814

Вказані показники процесу обраховували після безпосереднього вимірювання на кожній кулі її діаметра і відхилення від сферичної форми до і після проведення досліду [11]. 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} (тут і далі позначення згідно з ISO 3290-1:2014) і середній діаметр партії куль D_{wml} до і після обробки. Значення різномірності діаметра куль у партії V_{DwL} визначали як різницю між середніми діаметрами найбільшої й найменшої куль у партії. Відхилення від сферичної форми кулі Δ_{RSw} визначали як радіальну відстань між найменшою описаною сферою й найбільшою вписаною сферою, центри яких збігаються, і вимірювали за допомогою індикатора часового типу МИГ-1 з ціною поділки шкали вимірювань 1 мкм, що закріплений на магнітному штативі. Вимірювану кулю розташовували на установочному кільці із внутрішньою фаскою, щоб максимально наблизитися до умов контакту кулі і 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 діаметру кулі. У результаті вимірювань при повороті кулі на установочному кільці знаходили максимальне і мінімальне значення відхилення від сферичної форми кулі, різницю між якими вважали за відхилення від сферичної форми кулі Δ_{RSw} . Ненормований стандартом показник Δ_{RSwL} обраховували як середнє значення відхилення від сферичної форми куль у партії до й після обробки.

Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [11], під час обрахунку середніх значень показників, що вимірювалися – діаметра і відхилення від сферичної форми куль, серед останніх не знайдено з довірчою імовірністю 0,95 результатів, що різко виділяються серед інших. Перевірка дисперсій вибірок за критерієм Кохрена показала, що вони є однорідними. Тоді найкращою оцінкою дисперсії відтворюваності буде середньозважена дисперсія:

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

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 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 саме вплив режиму обробки, який відбувається на фоні загальної тенденції до монотонного лінійного або нелінійного спадання/зростання цих показників від свого вихідного значення до усталеного рівня за даної схеми доведення і даного часу обробки. Зазначена тенденція обумовлена на наш погляд, по-перше, поступовим переходом від обробки послабленого поверхневого шару як двошарової комбінації рельєфного й зруйнованого шарів до обробки саме

основного матеріалу і пов'язаним з цим підвищенням фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, що призводить до зменшення окружної подачі доведення 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 дослідів. Для цього використали метод графічної апроксимації вказаних залежностей монотонними безперервними функціями у часі [11]. Наслідком впливу режиму обробки у досліді вважали різницю між зміною обрахованого з дослідів значення кожного показника (Δd , Δd_n й $\Delta \delta$) і відповідною зміною значення апроксимаційної функції у цей момент загального часу обробки.

Для вивчення змінюваності досліджуваних показників процесу вибрано повний факторний експеримент типу 2^3 [12]. План експерименту передбачав варіювання факторів на двох рівнях: сили притиснення доводочного диску P_d – 100 і 200 Н, часу обробки куль між подачами суспензії t_0 – 30 і 60 хв., основи алмазної суспензії – масло і вода. Час проведення кожного дослідів становив 6 годин. За отриманими результатами дослідів будували лінійні моделі показників процесу з урахуванням взаємодії факторів, що варіюються.

Результати досліджень. Як видно з рисунку 2, змінювання діаметра кулі залежно від часу обробки t є монотонно спадаючим і його доцільно апроксимувати лінійною функцією. В той самий час залежність відхилення від сферичної форми є монотонно зростаючою, а різномірності діаметра партії куль – монотонно спадаючою, але їх доцільно апроксимувати нелінійними функціями (в обох випадках – другого порядку). Монотонне зростання відхилення від сферичної форми куль у часі пояснюється використанням у дослідів алмазної суспензії підвищеної зернистості і більш жорстким режимом обробки порівняно з початковою підготовкою куль.

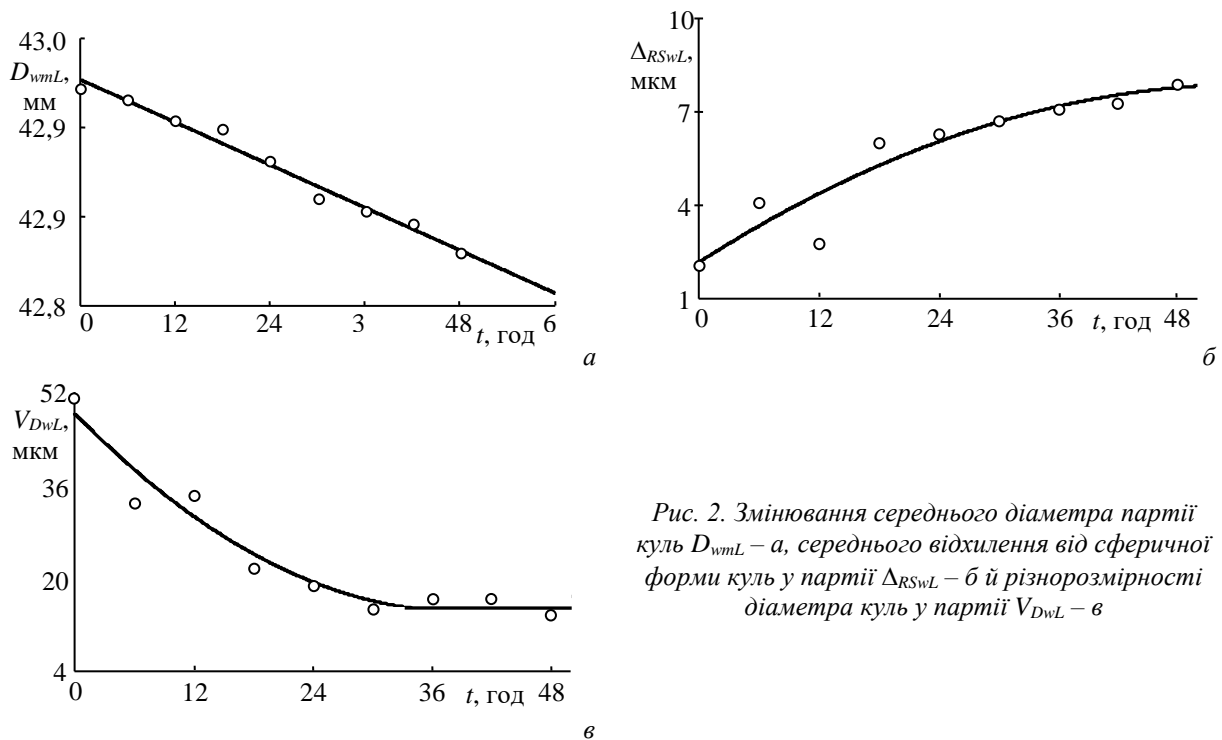


Рис. 2. Змінювання середнього діаметра партії куль D_{wmL} – а, середнього відхилення від сферичної форми куль у партії Δ_{RSwL} – б й різномірності діаметра куль у партії V_{DwL} – в

Додатне чи від'ємне значення відповідних складових A_3 , змінювання якої не залежить від впливу режиму обробки, отримували в результаті віднімання апроксимованого значення A_2 від його поточного значення A_1 у досліді (табл. 2). Від'ємне значення A_1 у досліді означає, що вимірюваний показник у результаті проведення дослідів збільшується, відповідно від'ємне значення A_3 означає, що вплив режиму обробки призводить до зменшення поточного значення вимірюваного у досліді показника відносно апроксимованого значення.

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

$$v_d = -0,1250 - 0,0417x_1 + 0,0417x_2 + 0,2083x_3 + 0,2917x_1x_2 - 0,2083x_1x_3 - 0,2083x_2x_3 + 0,7083x_1x_2x_3;$$

$$v_\delta = -0,0704 + 0,0096x_1 - 0,1679x_2 + 0,1017x_3 - 0,1038x_1x_2 - 0,0625x_1x_3 + 0,1042x_2x_3 + 0,0625x_1x_2x_3;$$

$$v_{\Delta d} = 0,0475 - 0,5613x_1 + 0,2479x_2 - 0,0538x_3 + 0,2567x_1x_2 + 0,5067x_1x_3 - 0,0750x_2x_3 - 0,0354x_1x_2x_3.$$

Таблиця 2

Матриця змінювання факторів у абсолютних величинах, значення досліджуваних показників процесу

Номер досліджу	$s_{в}$, мкм	$t_{ш}$, хв	n_1 , об/хв	Δd , мкм			v_d , мкм/год	$\Delta d_{ш}$, 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	100	1,0	масло	5	12	-7	-1,2	-2	-1,17	-0,83	-0,14	17	10,17	6,83	1,14
2	200	1,0	масло	12	12	0	0,0	1	-1,03	2,03	0,34	-1	8,49	-9,49	-1,58
3	100	0,5	масло	13	12	1	0,2	-3	-0,90	-2,10	-0,35	14	6,80	7,20	1,20
4	200	0,5	масло	10	12	-2	-0,3	-4	-0,77	-3,23	-0,54	3	5,11	-2,11	-0,35
5	100	1,0	вода	21	12	9	1,5	0	-0,64	0,64	0,11	4	3,42	0,58	0,10
6	200	1,0	вода	6	12	-6	-1,0	0	-0,50	0,50	0,08	-1	1,73	-2,73	-0,46
7	100	0,5	вода	7	12	-5	-0,8	0	-0,37	0,37	0,06	0	0	0	-0,00
8	200	0,5	вода	16	12	4	0,7	-1	-0,24	-0,76	-0,13	2	0	2	0,33

Примітка. Значення Δd , $\Delta \delta$ і $\Delta d_{ш}$, отримані з досліджу (A_1), при апроксимації (A_2), залежно від впливу режиму обробки (A_3).

Статистичну значущість коефіцієнтів рівнянь регресії перевіряли за критерієм Стюдента: модель v_d має 5 статистично значимих коефіцієнтів (крім b_1 і b_2), v_{δ} – 4 статистично значимі коефіцієнти (крім b_1 , b_5 і b_7) і $v_{\Delta d}$ – 1 статистично значимий коефіцієнт (b_5).

Результати перевірки адекватності отриманих рівнянь регресії результатам експериментів за критерієм Фішера наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Перевірка адекватності рівнянь регресії результатам досліджу

Показник	v_d	v_{δ}	$v_{\Delta d}$
Дисперсія відтворюваності $S_{відтв}^2$, мкм ²	1,053	0,302	2,253
Дисперсія адекватності $S_{ад}^2$, мкм ² /год ²	0,139	0,237	2,350
Розрахований F-критерій Фішера $f = S_{ад}^2 / S_{відтв}^2$	0,132	0,786	1,043
Табличний F-критерій Фішера для $p = 0,05$ і чисел ступенів свободи $f_{ад} = (N - 1)$, $f_{відтв} = N(m - 1)$	2,690 ($f_{ад} = 3$, $f_{відтв} = 112$)	2,450 ($f_{ад} = 4$, $f_{відтв} = 112$)	2,180 ($f_{ад} = 6$, $f_{відтв} = 112$)

З урахуванням результатів перевірки масмо такі моделі змінних процесу, адекватні вихідним даним:

$$v_d = -0,1250 + 0,2083x_3 + 0,2917x_1x_2 - 0,2083x_1x_3 - 0,2083x_2x_3 + 0,7083x_1x_2x_3;$$

$$v_{\delta} = -0,0704 - 0,1679x_2 + 0,1017x_3 - 0,1038x_1x_2 + 0,1042x_2x_3;$$

$$v_{\Delta d} = 0,0475 - 0,5613x_1 + 0,5067x_1x_3.$$

Обговорення результатів. Як видно з отриманих рівнянь регресії, вплив взаємодії факторів для кожного з досліджуваних показників процесу є не меншим за вплив саме досліджуваних факторів, тобто вказані рівняння регресії не є лінійними залежностями від досліджуваних факторів. Найбільший вплив на швидкість v_d чинить взаємодія всіх трьох факторів – її вплив є в 2,4–3,4 рази суттєвішим за інші. Відносно більший вплив (у 1,5 рази порівняно із впливом основи алмазної суспензії, взаємодії факторів) на швидкість v_{δ} має час t_o , на швидкість $v_{\Delta d}$ (у 1,4 рази порівняно із впливом сили P_d) – взаємодія сили P_d і основи алмазної суспензії.

Оскільки стратегічною метою процесу алмазного доведення керамічних куль з карбиду бору є в першу чергу максимально можливе виправлення відхилення від сферичної форми куль і різномірності діаметра куль у партії, а лише в другу чергу досягнення прийнятної продуктивності обробки, саме з такої точки зору варто визначати позитивний (+) або негативний (-) вплив режиму обробки на показники алмазного доведення керамічних куль.

Таблиця 4

Значення досліджуваних показників процесу за моделями

P_d , Н	t_o , год	Основа алмазної суспензії	v_d , мкм/год	v_{δ} , мкм/год	$v_{\Delta d}$, мкм/год	Позначення позитивного (+) і негативного (-) результатів
100	1,0	вода	-1,2	-0,0	1,12	-
200	1,0	вода	0,1	0,2	-1,02	+
100	0,5	вода	0,1	-0,3	1,12	-
200	0,5	вода	-0,3	-0,5	-1,02	-
100	1,0	масло	1,5	-0,0	0,10	-
200	1,0	масло	-0,9	0,2	-0,01	+
100	0,5	масло	-0,9	0,1	0,10	++
200	0,5	масло	0,7	-0,1	-0,01	-

Як видно з таблиці 4 і рисунку 3, позитивний результат, а саме забезпечення максимального додатного значення показника v_{δ} , досягається із підвищенням сили притиснення зі 100Н до 200Н, і стає кращим, якщо збільшувати час між подачами суспензії за будь-якої основи алмазної суспензії (рис. 3, б). За такого режиму обробки виправлення відхилення від сферичної форми куль має здійснюватися з максимальною швидкістю.

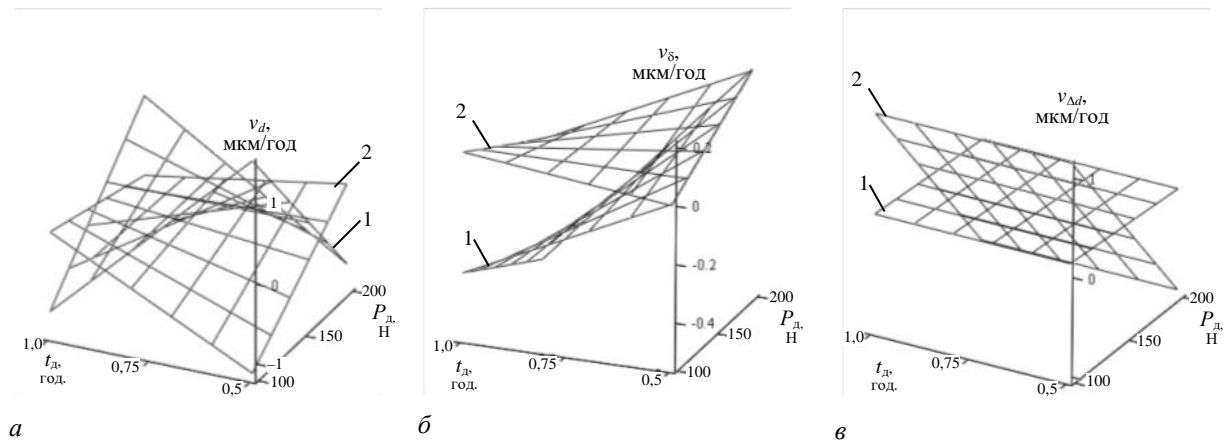


Рис. 3. Залежності показників v_d , v_{δ} і $v_{\Delta d}$ від сили P_d й часу обробки t_d за основи алмазної суспензії: вода (1) й масло (2)

Однак для одночасного забезпечення додатного значення показників v_{δ} і $v_{\Delta d}$, тобто одночасного зменшення і відхилення від сферичної форми куль, і різнорозмірності діаметра куль у партії, варто зменшувати силу притиснення до 100Н і час між подачами суспензії до 30 хвилин за обов'язкового використання алмазної суспензії на основі масла.

Висновки. В результаті експериментального дослідження впливу режиму обробки на показники алмазного доведення керамічних куль з карбиду бору визначене найбільш ефективно з точки зору одночасного зменшення і відхилення від сферичної форми куль, і різнорозмірності діаметра куль у партії поєднання досліджуваних факторів, а саме: зменшення значення сили притиснення до 100Н і часу між подачами суспензії до 30 хвилин за обов'язкового використання алмазної суспензії на основі масла.

Список використаної літератури:

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение / Под. ред. Н.В. Новикова // Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки. – К. : НАН Украины, 2007. – Т. 6. – 340 с.
2. Пасічний О.О. Підвищення ефективності прецизійної алмазної обробки деталей типу «куля» з конструкційної кераміки : автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.О. Пасічний. – К., 2002. – 22 с.
3. Hybrid Ball Bearings [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.bearingworks.com/products/hybrid-ball-bearings.php>.
4. ISO 3290-2:2014 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.iso.org/ru/standard/60133.html>.
5. Kang J. The polishing process of advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine / J.Kang, M.Hadfield // Proc. IMechE. Engineering Manufacture. – 2005. – Vol. 219. – P. 493–504.
6. Processing of high-precision ceramic balls with a spiral V-groove plate / M.Feng, Y.Wu, J.Yuan, Zh.Ping // Front. Mech. Eng. – 2017. – No 1. – P. 132–142.
7. Kinematics and trajectory in processing precision balls with eccentric plate and variable-radius V-groove / F.Zhou, J.Yuan, B.Lyu, W.Yao and other // Int. J. Adv. Manuf. Tech. – 2015. – No 9. – P. 2167–2178.
8. Lvu C.C. A Novel Eccentric Lapping Method with Two Rotatable Lapping Plates for Finishing Cemented Carbide Balls / C.C. Lvu, Y.L. Sun, D.W. Zuo // Int. J. Mech. and Mechatr. Eng. – 2015, – No. 5. – P. 684–691.
9. 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 / Т.А. Прихна, А.В. Старостина, Д.Лицендорф, И.А. Петруша и др. // Сверхтв. материалы. – 2014. – № 1. – С. 14–26.
10. Гусев В.В. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики : монография / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова. – Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 250 с.
11. Вплив режиму обробки на показники алмазного шліфування керамічних куль з карбиду кремнію / С.В. Сохань, А.Л. Майстренко, В.Г. Сороченко та ін. / Сверхтв. материалы, – 2018. – № 6. – С. 50–64.
12. Кононюк А.Е. Основы научных исследований. Общая теория эксперимента / А.Е. Кононюк. – К. : Изд-во КНТ, 2011. – 453 с.

References:

1. Novikova, N.V. (ed.) (2007), «Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primeneniye», *Almazno-abrazivnyy instrument v tehnologijah mehanoobrabotki*, Vol. 6, NAN Ukrainy, K., 340 p.
2. Pasichnij, O.O. (2002), *Pidvishhennja efektyvnosti precizijnoi almaznoi obrobki detalej tipu «kulja» z konstrukcijnoi keramiki*, Dissertation of kand. tehn. nauk, K., 22 p.
3. «Hybrid Ball Bearings», [Online], available at: <https://www.bearingworks.com/products/hybrid-ball-bearings.php>
4. «ISO 3290-2:2014», [Online], available at: <https://www.iso.org/ru/standard/60133.html>
5. Kang, J. and Hadfield, M. (2005), «The polishing process of advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine», *Proc. IMechE. Engineering Manufacture*, Vol. 219, pp. 493–504.
6. Feng, M., Wu, Y., Yuan, J. and Ping, Zh. (2017), «Processing of high-precision ceramic balls with a spiral V-groove plate», *Front. Mech. Eng.*, No 1, pp. 132–142.
7. Zhou, F., Yuan, J., Lyu, B., Yao, W. and other (2015), «Kinematics and trajectory in processing precision balls with eccentric plate and variable-radius V-groove», *Int. J. Adv. Manuf.*, No 9, pp. 2167–2178.
8. Lv, 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. and Mechatr. Eng.*, No. 5, pp. 684–691.
9. Prihna, T.A., Starostina, A.V., Lickendorf, D., Petrusha, I.A. and other (2014), «Issledovanie stojkosti k okisleniju, mehanicheskikh harakteristik materialov na osnove MAH-faz sistem Ti–Al–(C,N) i vozmozhnosti ih ispol'zovanija v kachestve instrumental'nyh svjazok i dlja polirotovanija», *Sverhtv. Materialy*, Vol. 1, pp. 14–26.
10. Gusev, V.V. and Kalafatova, L.P. (2012), *Tehnologicheskoe obespechenie kachestva obrabotki izdelij iz tehnichejskoj keramiki*, monografija, GVUZ «DonNTU», Doneck, 250 p.
11. Sohan', S.V., Majstrenko, A.L., V.G. Sorochenko and other (2018), «Vpliv rezhimu obrobki na pokazniki almaznogo shlifuvannja keramichnih kul' z karbidu kremniju», *Sverhtv. materialy*, Vol. 6, pp. 50–64.
12. Kononjuk, A.E. (2011), *Osnovy nauchnyh issledovanij. Obshhaja teorija jeksperimenta*, Izd-vo KNT, K., 453 p.

Сохань Сергій Васильович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України

Наукові інтереси:

- формоутворення прецизійних елементів складнопрофільних виробів алмазною обробкою

Возний В'ячеслав Вікторович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України

Наукові інтереси:

- формоутворення прецизійних елементів складнопрофільних виробів алмазною обробкою

Сороченко Валерій Григорович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- формоутворення прецизійних елементів складнопрофільних виробів алмазною обробкою

Стаття надійшла до редакції 22.02.2019.