

УДК 621.9.025.77:615.46:616.728

А.К. Тихоновський, В.О. Федько, С.В. Сохань

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Особливості алмазного шліфування керамічних куль

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 і якістю виготовлення деталей типу "куля". Заміна сталевих куль на керамічні в багатьох випадках дозволяє досягти більш високих експлуатаційних показників і розширити область функціональних можливостей пристроїв, у яких вони застосовуються [1]. Ряд фірм США, Європи, Японії, КНР та Росії вже сьогодні випускають та експлуатують керамічні або гібридні підшипники кочення.

Найбільш складним при виготовленні підшипників кочення є технологічний процес виготовлення куль. Вимоги до точності і якості виготовлення прецизійних керамічних куль великого діаметру (рис. 1) надзвичайно високі – для керамічних куль степені точності G40 (діаметром до 50 мм) відхилення від сферичної форми куль $\leq 1,0$ мкм, непостійність діаметру кулі $\leq 1,0$ мкм, а якість виготовлення по параметру шорсткості поверхні виробів $Ra \leq 0,06$ мкм [2]. Вказані вимоги забезпечуються груповою алмазно-абразивною обробкою у кілька стадій.



а)

б)

Рис. 1. Вигляд керамічних заготовок після спікання (а) й готових куль з карбіду кремнію (б) [3]

Групова абразивна обробка куль є найбільш універсальною операцією виробництва куль і по цей час привертає увагу дослідників [4–5]. Алмазне шліфування або доведення керамічних виробів, зокрема з карбідів бору або кремнію як і будь-якого крихкого неметалевого матеріалу, докорінно відрізняється від процесу алмазного шліфування металів. Тут 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 припуску визначається як фізико-механічними властивостями матеріалу (табл. 1), так і навантаженням на зерна абразиву (залежно від режимів обробки).

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

Показник	Керамічний матеріал	
	SiC**	B ₄ C*
Густина, 10 ⁻³ кг/м ³	3,12	2,48–2,52
Модуль пружності, ГПа	413	420–430
Мікротвердість H_{μ} , ГПа	20,0	22,0–25,0
Границя міцності під час згинання R_{bt} , МПа	370	210–230
Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень	4,6	3,5–3,9
I типу K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}		
Індекс крихкості H_{μ}/K_{Ic} , 10 ⁻³ м ^{-1/2}	4,35	6,29–6,41

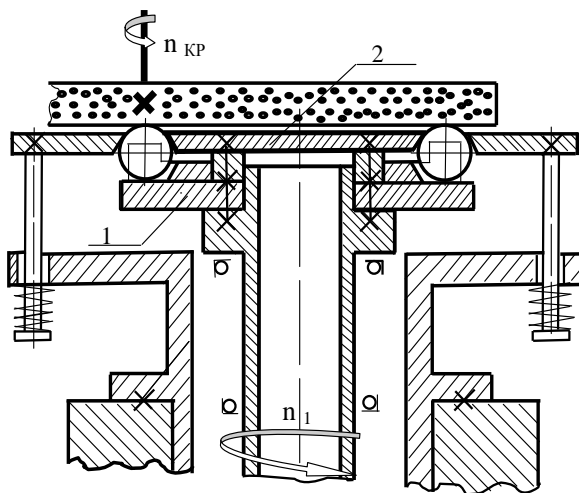
*Гаряче пресування.

**Реакційне спікання.

В даній роботі представлені результати експериментальних досліджень, метою яких було вивчення впливу режиму обробки, фізико-механічних властивостей керамічних матеріалів на алмазне шліфування керамічних куль з карбідів бору і кремнію.

В дослідженнях використовували модернізований шарикошліфувальний верстат мод. ВШ-Д204М з встановленим на його робочому столі технологічним пристроєм для розміщення куль (рис. 2) [3]. За допомогою пристрою розділено кінематичні ланцюги, якими забезпечують здійснення власне формотворних 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.



а)



б)

Рис. 2. Схема шліфування керамічних куль (а) та їх розташування у пристрої (б)

Показниками процесу шліфування були швидкість знімання припуску $v_d = \Delta d/t$ (швидкість зменшення діаметру кулі) та швидкість змінювання форми поверхні куль $v_\delta = \Delta \delta/t$. Досліджували вплив таких режимних параметрів, як дискретна подача круга на врізання s_b , час шліфування куль між подачами $t_{ш}$ та індекс крихкості керамічних матеріалів $\chi = H_\mu/K_{Ic}$.

Вказані показники процесу обраховували після безпосереднього вимірювання на кожній кулі її діаметру і відхилення від сферичної форми до і після проведення досліду. На основі вимірювань обраховували середній діаметр кожної кулі D_{wm} (тут і далі позначення згідно ISO 3290-1:2014) і середній діаметр партії куль D_{wmL} до і після обробки. Відхилення від сферичної форми кулі Δ_{RSw} визначали як радіальну відстань між найменшою описаною сферою й найбільшою вписаною сферою, центри яких співпадають.

Для вивчення тенденцій змінювання досліджуваних показників процесу вибрано повний факторний експеримент типу 2^3 [6]. План експерименту передбачав варіювання факторів на наступних двох рівнях: дискретна подача круга на врізання s_b дорівнювала 20 і 50 мкм, час шліфування куль між подачами $t_{ш}$ – 10 і 20 хв, індекс крихкості керамічних матеріалів χ – 4350 (карбід кремнію – SiC) і 6350 м^{-1/2} (карбід бору – B₄C). У дослідах застосували

алмазний шліфувальний круг форми 6A2T з алмазами марки AC32 зернистістю 250/200 відносної концентрації 100. Кількість куль у партії, що оброблювалися одночасно, складала 8 шт. Швидкість обертання стола з кулями в сепараторі дорівнювала 35 об/хв. Вихідне значення вимірюваних параметрів куль до проведення дослідів – середній діаметр партії куль з карбіду кремнію $D_{wmL} = 43,29$ мм, з карбіду бору $D_{wmL} = 42,029$ мм, середнє відхилення від сферичної форми куль з карбіду кремнію – 248 мкм, з карбіду бору – 87 мкм. Час проведення кожного дослідів становив 40 хв.

Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [6] 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.

Матриця змінювання факторів у абсолютних величинах, значення досліджуваних показників процесу подані у табл. 2.

Таблиця 2. Матриця змінювання факторів у абсолютних величинах, значення досліджуваних показників процесу

Номер дослідів	s_b , МКМ	$t_{ш}$, ХВ	χ , $M^{-1/2}$	v_d , МКМ/ХВ	v_8 , МКМ/ХВ
1	20	10	4350	1,8	2,5
2	50	10	4350	4,7	1,3
3	20	20	4350	1,8	0,3
4	50	20	4350	3,8	-0,3
5	20	10	6350	1,6	-0,3
6	50	10	6350	3,9	0,2
7	20	20	6350	0,8	0,5
8	50	20	6350	2,1	-0,2

В побудованих лінійних моделях досліджуваних показників процесу з урахуванням взаємодії факторів у нормованому вигляді перевіряли статистичну значимість коефіцієнтів рівнянь регресії за критерієм Стюдента: модель v_d має 6 статистично значимих коефіцієнтів (крім b_7), а модель v_8 – також 6 статистично значимих коефіцієнтів (крім b_4). Адекватність отриманих рівнянь регресії результатам експериментів перевіряли за критерієм Фішера (табл. 3).

Таблиця 3. Перевірка адекватності рівнянь регресії результатам дослідів

Показник	ν_d	ν_δ
Дисперсія відтворюваності $S_{\text{відтв}}^2$, мкм ²	0,044	0,460
Дисперсія адекватності $S_{\text{ад}}^2$, мкм ² /год ²	0,016	0,092
Розрахований F -критерій Фішера $f = S_{\text{ад}}^2 / S_{\text{відтв}}^2$	0,373	0,200
Табличний F -критерій Фішера для $p = 0,05$ і чисел ступенів свободи $f_{\text{ад}} = (N - 1)$, $f_{\text{відтв}} = N(m - 1)$ ($f_{\text{ад}} = 1$, $f_{\text{відтв}} = 56$) ($f_{\text{ад}} = 1$, $f_{\text{відтв}} = 56$)	4,012	4,012

З урахуванням результатів перевірок отримали наступні моделі змінних процесу, адекватні вихідним даним:

$$\nu_d = 2,5684 + 1,0668x_1 - 0,4457x_2 - 0,4551x_3 - 0,2348x_1x_2 - 0,1566x_1x_3 - 0,1832x_2x_3;$$

$$\nu_\delta = 0,4973 - 0,2410x_1 - 0,4160x_2 - 0,4574x_3 + 0,2121x_1x_3 + 0,5090x_2x_3 - 0,2371x_1x_2x_3.$$

Як видно з отриманих рівнянь регресії і рис. 3, вплив взаємодії факторів на швидкість ν_d є в 2–5 разів меншим (коефіцієнт впливу $\approx 0,2$) за вплив власне досліджуваних факторів (коефіцієнт впливу від 0,45 до 1,1), тобто рівняння регресії можна вважати наближеним до лінійної залежності від досліджуваних факторів. Найбільший вплив на швидкість ν_d має подача на врізання s_b , в той час як вплив інших факторів удвічі менший.

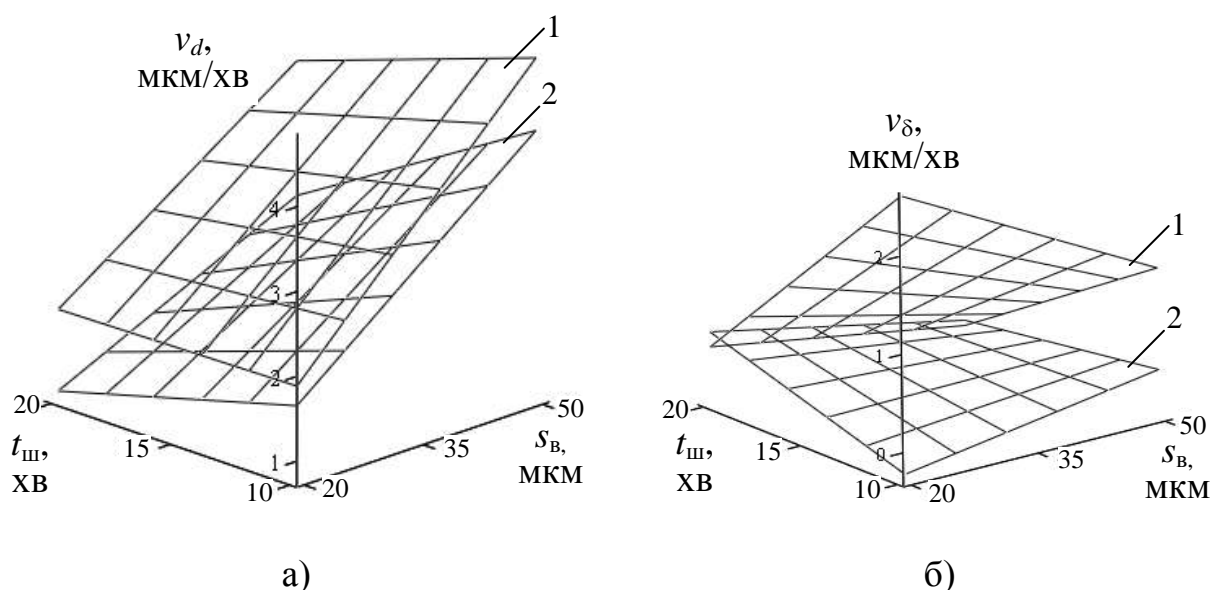


Рис. 3. Залежності показників ν_d (а) і ν_δ (б) від подачі s_b й часу шліфування $t_{\text{ш}}$ керамічних куль з карбіду кремнію (1) й карбіду бору (2)

На швидкість v_s найбільше впливають час шліфування $t_{ш}$, індекс крихкості χ і їх взаємодія (коефіцієнт впливу 0,42-0,51), а вплив інших факторів удвічі менший. Звідси рівняння регресії є істотно нелінійним.

Оскільки стратегічною метою процесу алмазного шліфування керамічних куль є в першу чергу максимально можливе виправлення відхилення від сферичної форми куль, а лише в другу чергу досягнення прийнятної продуктивності обробки, саме з такої точки зору визначали позитивний чи негативний вплив режиму обробки на показники алмазного шліфування керамічних куль з карбіду кремнію й карбіду бору.

Висновок:

В результаті дослідження встановлено, що для зменшення відхилення від сферичної форми куль з карбіду кремнію слід зменшувати і подачу на врізання, і час шліфування, в той час як для куль з карбіду бору доцільним буде зменшувати подачу на врізання і одночасно збільшувати час шліфування.

Список використаних джерел

1. Hybrid Ball Bearings. – <https://www.bearingworks.com/products/hybrid-ball-bearings.php>.
2. ISO 3290-2:2014. – <https://www.iso.org/ru/standard/60133.html>.
3. Сохань С. В., Майстренко А. Л., Сороченко В. Г., Возний В. В., Кулич В. Г., Гаманюк М. П., Зубанев Є. М. Вплив режиму обробки на показники алмазного шліфування керамічних куль з карбіду кремнію / Сверхтв. материалы, – 2018. – № 6. – С. 50–64..
4. 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.
5. Ma W. High efficiency ultra-precision grinding of ceramic balls: Dissertation ... for the Doctoral Degree. – Saga: Saga University, 2013.
6. Кононюк А. Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента): В 4 т. Т. 2. – К.: Изд-во КНТ, 2011. – 453 с.