

УДК 661.687:[621.923.4:621.922.34]

В. І. Лавріненко

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

lavrinen52@gmail.com

Нітрид кремнію як керамічний матеріал технічного застосування: особливості його алмазної обробки та його місце серед інших керамік

Досліджено особливості алмазної обробки виробів з кераміки на основі нітриду кремнію. Показано, що така кераміка за ступенем окислення, рівнем температури у зоні обробки під час шліфування та за силовими показниками процесу алмазного шліфування керамічних матеріалів є проміжною між оксидною і оксидно-карбідною кераміками. Встановлено, що за показником питомої енергоємності шліфування найменшу енергоємність обробки мають оксидні кераміки. У порівнянні з ними енергоємність шліфування оксидно-карбідної кераміки у 2–3 рази більша, а найбільшу питому енергоємність шліфування має нітридна кераміка як за умов глибинного шліфування, так і за умов пружного шліфування, що слід враховувати під час визначення умов обробки виробів з нітридної кераміки.

Ключові слова: *нітрид кремнію, керамічні кульки, інструментальна кераміка, алмазне шліфування, питома енергоємність шліфування.*

Керамічні матеріали посідають чільне місце в сучасному машинобудуванні. Серед них значну увагу приділяють нітриду кремнію (Si_3N_4), що підтверджується сучасними публікаціями. Кераміка з Si_3N_4 є винятковим функціональним конструкційним матеріалом, що вирізняється своїми чудовими властивостями, такими як низька густина, електроізоляція, стійкість як до високих, так і до низьких температур, а також зносостійкістю в порівнянні з іншими керамічними матеріалами [1]. Це визначає її ефективність у таких технічних застосуваннях, як кульки для високоякісних кулькових керамічних підшипників та тестових трибологічних випробувань, а також як ефективний інструментальний матеріал. Її широко застосовують у передових розробках – в аерокосмічній промисловості, електромобілях, прецизійних верстатах, морському обладнанні. Наприклад, традиційні сталеві підшипники, що застосовують у шпинделях авіаційних двигунів, часто піддаються сильному зносу і

руйнуванню від адгезії в екстремальних умовах, таких як високі температури, швидкості і навантаження та недостатнє змащування. Навпаки, керамічні підшипники з Si_3N_4 демонструють чудові характеристики в цих складних умовах. Зокрема, вони були успішно інтегровані в рідинний ракетний двигун важкої ракети-носія Long March 5 (Китайська Народна Республіка) [1]. Із врахуванням цих переваг, провідний світовий виробник підшипників, група SKF, визначила розробку високоякісних кулькових керамічних підшипників із Si_3N_4 як стратегічний пріоритет [1]. В Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України проводять розробки з отримання керамічних кульок для підшипників, зокрема з нітридної кераміки [2].

Водночас нітрид кремнію у вигляді керамічних кульок є також чудовим тестовим трибологічним матеріалом, особливо для високотвердих матеріалів, насамперед алмазних [3–8].

Наведене вище стосується керамічних кульок, але й циліндричні ролики з кераміки Si_3N_4 слугують в якості тіл кочення прецизійних підшипників. Ці ролики особливо варто використовувати для обладнання, що працює в умовах великих навантажень і високих швидкостей [9]. Якість зовнішньої поверхні цих роликів істотно впливає як на їхню точність, так і на термін служби підшипника. Через високу твердість і крихкість кераміки Si_3N_4 її обробка є досить проблемною. У [9] представлено новий метод пружного двостороннього шліфування для обробки циліндричних роликів з Si_3N_4 із застосуванням на верхньому і нижньому дисках алмазних плівкових накладок. Зернистість алмазного порошку спричиняє найбільший вплив на швидкість знімання матеріалу, далі йдуть тиск притиснення і відношення швидкостей дисків. Для дрібних алмазів зменшення тиску притиснення і часу обробки поліпшує шорсткість поверхні R_a . Це дозволяє отримати бездефектні поверхні керамічних циліндричних роликів з шорсткістю 6 нм і відхиленням 2 нм [9].

У згаданих вище публікаціях викладено конструкційні та трибологічні характеристики виробів з нітриду кремнію, причому звернуто увагу на шорсткість їхньої поверхні, але лише в [9] розглянуто деякі питання, пов'язані з їхнім алмазним шліфуванням. Але у [2, 9], де досліджували шліфування кераміки із Si_3N_4 , не розглядали особливості саме алмазної обробки таких керамік та порівняння їхньої оброблюваності з іншими кераміками. Тому в представлений роботі розглянуто саме особливості алмазної обробки кераміки з нітриду кремнію. Для порівнювання розглянуто також стандартні матеріали, які вже тривалий час застосовують в інструментальному виробництві – нітридну, оксидну та оксидно-карбідну кераміки, оскільки широко відомі їхні властивості, а також дані їхнього алмазного шліфування.

Спочатку розглянуто дані, отримані раніше [10]. В табл. 1 представлено основні властивості нітридної (силініт), оксидної (BO13) та оксидно-карбідної (BOK60) керамік. Нітридна кераміка істотно відрізняється від оксидної і оксидно-карбідної керамік за модулем пружності та енергією руйнування. За ступенем окиснення під час динамічного нагрівання нітридна кераміка (силініт) знаходиться посередині між оксидною керамікою (BO13), що майже не окиснюється до температур у 1673 К та оксидно-карбідною (BOK60), що активно окислюється після 1373 К. Окиснення силініту має особливість – за температури 1573 К його маса перестає збільшуватися. Ймовірно, це пов'язано з утворенням на поверхні тонких оксидних плівок з кремнезему, які виключають можливість взаємодії нітриду кремнію та кисню. На це вказує те, що за даними рентгенівського фазового аналізу за температури 1673 К в окисненому шарі силініту знаходяться Si , $\text{SiO}_2\text{-}\beta$ і MgSiO_4 [10].

Таблиця 1. Властивості інструментальних керамік [10]

Властивість	Марка кераміки		
	силініт	ВО13	ВОК60
Густина, $\cdot 10^3$ кг/м ³	3,2–3,4	3,92–3,95	4,20–4,28
Твердість <i>HV</i> , ГПа	20,6	19,1–23,2	22–27,5
Модуль пружності, ГПа	240	399±6	400–420
Енергія руйнування, Дж/м ²	40	12,8	13
В'язкість руйнування, МПа·м ^{1/2}	4,40–4,55	3,2–4,1	3,62
Температура початку активного окиснення, К	1430	під час нагрівання до температури 1673 К не окиснюється	970–990

За рівнем температури початку активного окиснення у зоні шліфування нітридна кераміка є проміжною між оксидною і оксидно-карбідною кераміками. Так, для умов шліфування з продуктивністю 1188 мм³/хв з охолодженням у зоні шліфування оксидної кераміки (ВО13) температура дорівнює 96 °С, оксидно-карбідної (ВОК71) – 263 °С, а нітридної (силініту) – 143 °С [10].

Аналогічним є значення силових показників силініту і у разі аналізу процесу алмазного шліфування інструментальних керамік (табл. 2). Аналіз табл. 2 свідчить, що нітридна кераміка є проміжною між оксидною і оксидно-карбідною кераміками, але за своїми показниками ближче до оксидно-карбідної кераміки.

Таблиця 2. Силові показники процесу алмазного шліфування інструментальних керамік [10]

Кераміка	Марка кераміки	Складові зусилля шліфування, <i>H</i>				Коефіцієнт абразивного різання <i>f_a</i>
		<i>R</i>	<i>P_x</i>	<i>P_y</i>	<i>P_z</i>	
Оксидно-карбідна	ВОК60	76,5	1,0	73,0	23,0	0,31
	ВОК71	77,8	1,1	74,0	24,0	0,32
Нітридна	силініт	89,8	2,2	88,0	17,6	0,20
Оксидна	ВО13	140,3	7,8	140,0	9,0	0,064

Було розглянуто особливості шламу силініту, що утворюється у разі його алмазного шліфування, у порівнянні з іншими інструментальними кераміками. Було досліджено наявність шламу на різальній поверхні алмазних кругів під час обробки низки інструментальних матеріалів та за різних умов їхньої обробки. Досліджували процеси алмазної обробки керамік ВОК60, ВОК71, силініт, а також кераміки зі суміші нітриду і карбіду (Si₃N₄ + B₄C).

Дослідженнями за допомогою гранулометрії CILAS було встановлено, що розміри частинок шламу розподіляються у такий спосіб (в табл. 3): основна маса шламу складається з дрібних (від 1 до 3 мкм) частинок та з більш крупних частинок, зернистість яких для різних матеріалів змінюється від 32–48 до 96–128 мкм. Наведене вище свідчить про те, що дрібний шлам, який утворюється під час шліфування та проходить шлях від утворення до повторного надходження в зону шліфування разом з охолоджувальною рідиною, частково перетворюється і його частина може компактуватися зі створенням більш крупних частинок.

Таблиця 3. Геометричні розміри частинок шламу для різних інструментальних керамік

Матеріал частинок шламу	Доля частинок шламу, %, в розмірному діапазоні, мкм						
	до 1,0	1–1,5	1,5–2,0	2–3	32–48	64–96	96–128
Шлам не компактується							
Si ₃ N ₄ +B ₄ C	58,2	19,3	3,1	16,6	–	2,3	–
Шлам компактується на менших діапазонах							
Al ₂ O ₃ +TiC (BOK60)	15,8	3,2	8,0	–	26,9	29,2	16,1
Al ₂ O ₃ +TiC (BOK71)	5,1	1,3	3,7	2,3	39,8	30,5	16,9
Шлам компактується на більших діапазонах							
Si ₃ N ₄ (силініт)	5,0	0,9	1,8	3,4	15,9	14,6	57,3
Al ₂ O ₃ (BO13)	3,1	0,5	0,8	1,2	13,1	8,6	71,9

Примітка. Доля частинок шламу в діапазоні 3–32 мкм для всіх матеріалів була дуже малою (0,4–1,1 %), тому в таблиці ці діапазони не наведено.

Аналіз даних табл. 3 з розподілу частинок шламу свідчить, що він реалізується для частинок різної зернистості, причому зустрічаються достатньо крупні частинки шламу, які є наслідком як виколот оброблюваного матеріалу, так і компактування шламу. Нітридна або оксидна кераміка без домішок мають переважно компактовані частинки розміром від 32 до 128 мкм, причому більша частина знаходиться в діапазоні 96–128 мкм. У змішаній оксидно-карбідній кераміці також переважно фіксують зернистість частинок у цьому ж діапазоні, але більша частина має менші розміри. Загалом за вмістом частинок шламу розміром до 3 мкм і в діапазоні 32–96 мкм нітридна кераміка є також проміжним матеріалом між оксидною та оксидно-карбідною кераміками.

Але за своїми властивостями – модулем пружності, в'язкістю руйнування, а особливо за енергією руйнування (див. табл. 1), нітридна кераміка доволі суттєво відрізняється від оксидної та оксидно-карбідної керамік. Було порівняно питому енергоємність шліфування різних інструментальних керамік за умов пружної обробки (табл. 4) та жорсткої глибинної обробки із заздалегідь визначеними режимами (табл. 5). Питому енергоємність шліфування визначали за розробленою автором методикою [11].

Встановлено, що найменшою енергоємністю шліфування відзначається оксидна кераміка, оксидно-карбідна кераміка в порівнянні має у 2–3 рази більшу енергоємність шліфування, а найбільшу питому енергоємність шліфування має нітридна кераміка як за умов пружного шліфування, так і за умов глибинного шліфування. Для нітридної кераміки енергія руйнування є найвищою – 40 Дж/м², що в 3 рази перевищує енергію руйнування для оксидних та оксидно-карбідних керамік. Тобто, тенденції зміни даних за питомою енергоємністю шліфування та питомою енергією руйнування співпадають, і саме нітридна кераміка характеризується найвищою серед інших керамік питомою енергоємністю шліфування, що і є найбільш принциповою особливістю алмазної обробки таких нітридних керамік.

Для трибологічного застосування нітридних керамік є важливим значення їхнього коефіцієнта абразивного різання, адже він у певній мірі характеризує і коефіцієнт тертя [12]. Коефіцієнт абразивного різання f_a нітридної кераміки дорівнює 0,2 (див. табл. 2), що не є низьким значенням у порівнянні, наприклад, із оксидною керамікою. Водночас саме кульки з нітридної кераміки, з

врахуванням її теплових властивостей, застосовують у трибометрах “кулька на диску” [3–8], хоча вказують на підвищений коефіцієнт тертя (КТ) нітридної кераміки.

Таблиця 4. Експлуатаційні показники процесу пружного алмазного шліфування з охолодженням різних керамік алмазним кругом 12A2-45° 150×10×3×32 AC6 125/100 M1-10 100 за тиску притиснення 1,6 МПа

Марка кераміки	Продуктивність шліфування, мм ³ /хв	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати алмазів у крузі під час шліфування, мг/г	Питома енергоємність шліфування, кДж/кг
Оксидна кераміка				
BO13	644	0,9	1,64	107
Оксидно-карбідна кераміка				
ВОК60	3045	1,5	6,33	214
Нітридна кераміка				
Силініт	7228	1,2	21,8	282

Таблиця 5. Експлуатаційні показники процесу глибинного алмазного шліфування з охолодженням різних керамік алмазним кругом 12A2-45° 150×10×3×32 – AC4 100/80 B2-08 100

Марка кераміки	Продуктивність шліфування, мм ³ /хв	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати алмазів у крузі під час шліфування, мг/г	Питома енергоємність шліфування, кДж/кг
Оксидна кераміка				
BO13	500	0,2	0,7	19,2
Оксидно-карбідна кераміка				
ВОК60	375	0,2	1,7	62,2
Нітридна кераміка				
Силініт	375	0,2	5,0	182,9

Так, у [3] порівнювали п’ять різних кульок (Ø 25,4 мм): керамічну (Si₃N₄), металеву (сталь AISI 52100) та три кульки з термопластичних полімерів. У випробуваннях застосовували стенд для мікроабразивного тесту з фіксованою кулькою, зразки з аустенітної нержавіючої сталі AISI 304, абразивні частинки кремнезему (концентрація шламу – 10 % (за масою)). Більш тверді керамічні кульки викликали і більш високе тертя, але мали найнижчу швидкість зношування, ніж м’які полімерні кульки. Тобто, саме нітридна кулька серед інших випробуваних кульок мала найбільший КТ. У [4] для порівняння фрикційних властивостей карбідокераміки і вуглецевих сталей було проведено експерименти щодо зворотно-поступального тертя на повітрі, у якості матеріалу кульок застосовували карбіди з SiC, WC, TiC, а також з Si₃N₄, TiN та TiAlN. Під час тертя між керамічною кулькою із Si₃N₄ і сталевую пластинною SKH4 коефіцієнт тертя дорівнював 0,4–0,5, а у разі використання карбідів SiC і WC значення були меншими – 0,2–0,3. Крім того, було проведено експерименти із застосуванням різних сталей як контрматеріалів: JIS SKH4 (вміст вуглецю 0,73–0,83 %), JIS SUS430 (вміст вуглецю < 0,12 %) і JIS 312L

(вміст вуглецю < 0,02 %). За допомогою спектроскопії комбінаційного розсіювання світла показано, що продукти зносу пластини SKH4 містять велику кількість графітоподібних матеріалів, водночас продукти зносу пластини SUS430, що має високий коефіцієнт тертя, містили лише невелику їхню кількість. Ці результати продемонстрували [4], що вуглець у сталі утворює графітоподібний матеріал під час тертя і знижує коефіцієнт тертя за рахунок зменшення сили зсуву і зменшення адгезії.

Крім дослідження трибоконтакту Si_3N_4 та сталей, є значний інтерес і до трибоконтакту Si_3N_4 та полікристалічних алмазних композитів (ПАК). Трибологічна поведінка ПАК у вакуумному середовищі в умовах високих і низьких температур, що чергуються, у [5] оцінювали за допомогою трибометра “кулька на диску”, причому матеріалом кульки був саме Si_3N_4 . За таких умов адгезія матеріалу Si_3N_4 відбувалася в області зносу і утворювалися зв'язки Si–C. Механізм зносу був обумовлений комбінацією абразивної і адгезійної взаємодії в контактній зоні. Приведені вище результати показують, що адгезія Si_3N_4 і утворення зв'язків Si–C призводить до високої сили тертя, водночас графітизація послаблює силу зв'язку між алмазними зернами і робить їх більш схильними до від'єднання під час ковзання. На ефект графітизації було звернено увага і в інших роботах. У [6] кульки з Si_3N_4 було застосовано в експериментах по фрикційному зносу за температур 200, 300 та 400 °C. Результати засвідчили, що коефіцієнт тертя і швидкість зносу збільшуються з підвищенням температури. Саме за високих температур тертя ПАК може зношуватися через графітизацію. У [7] запропоновано новий механізм високоефективного полірування алмазу, що пов'язаний з розривом зв'язку C–C. Експерименти з лінійним зворотно-поступальним ковзанням за допомогою кульки Si_3N_4 показали, що матеріал видаляється у вигляді графіту, а не сколюється як фрагменти алмазного матеріалу. У [8] досліджено тертя та зношування по сталі GCr15 та кераміці Si_3N_4 двох типів ПАК: отриманого хімічним осадженням з парової фази (HFCVD) та спеченого за високого тиску і високої температури (HPHT). Встановлено, що, по-перше, КТ зростає зі збільшенням шорсткості поверхні ПАК, а по-друге, як КТ, так і швидкість зношування керамічних куль Si_3N_4 по зразку HFCVD були загалом вищими, ніж у сталевих куль GCr15.

Наведене вище підтверджує більші значення КТ для кераміки Si_3N_4 у порівнянні з іншими матеріалами, але дослідники для трибометра “кулька на диску” вибирають кульку саме з нітридної кераміки. Під час застосування кульки з Si_3N_4 , як у разі тертя по сталі, так і тертя по ПАК, у зоні тертя утворюється графітоподібний матеріал, який зменшує тертя, що і пояснює переважне застосування кульок з Si_3N_4 , особливо в критичних умовах, де крім іншого має значення їхня теплова стійкість. Нагадаємо, що початок активного окиснення для них досить високий (див. табл. 1), а також підвищена енергія руйнування, а відтак кращою є зносостійкість на стирання.

Тобто, керамічні кульки з Si_3N_4 мають у порівнянні з іншими керамічними кульками меншу інтенсивність зносу під час тертя, але і коефіцієнт тертя у них вищий. Якщо для вказаних вище трибоконтактів це не є суттєвим, то для кульок керамічних підшипників поліпшення трибологічних властивостей кераміки Si_3N_4 є критично важливим напрямком досліджень [1]. Для подальшого підвищення стійкості керамічних підшипників у низькотемпературних середовищах за допомогою іскрового плазмового спікання було отримано нові керамічні самозмащувальні композити Si_3N_4 , що містять мікро- та наномасштабний графен і $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ нитковидні кристали. Результати показали, що

коефіцієнт сухого тертя ковзання кераміки Si_3N_4 за навантаження 10–20 Н та температури 77 К змінюється від 0,11 до 0,28, що менше на 6,67–64,52 % у порівнянні з тим самим навантаженням, але за температури 298 К [1].

Але є і інший варіант зміни фрикційних характеристик нітридної кераміки для керамічних підшипників. У [6] було показано, що карбідна кераміка має менший КТ, ніж нітридні, але нітридні є більш тепло- і зносостійкими, тобто є ще інші варіанти, крім приведеного в [1], поєднання нітридів і карбідів в матеріалі керамічних кульках. Одним з таких варіантів є сполучення $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$, на його застосування саме для керамічних кульок було звернуто увагу в [13].

Шлам змішаних нітридно-карбідних керамік $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$ є відмінним від інших керамік. Він фактично не компактується (див. табл. 3) і є дрібнодисперсним, тобто має інший механізм зношування на відміну від інших керамік і це опосередковано вказує на менший коефіцієнт абразивного різання. Це було підтверджено в [13], де показано, що коефіцієнт абразивного різання під час шліфування для оксидно-карбідних керамік дорівнює 0,23, для оксидних – 0,07, а для керамік $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$ є найменшим – 0,04, і матиме найменший коефіцієнт тертя. Тобто, саме така комбінована кераміка є перспективною для кульок керамічних підшипників. У разі шліфування нітридної кераміки з доданням карбиду бора необхідно розвивати значно більші нормальні зусилля, наближені до оксидної кераміки. Це слід враховувати особливо за умов пружного шліфування, характерного для шліфування керамічних кульок [2] або роликів [9]. На жаль, цей напрямок застосування змішаної кераміки в кульках для підшипників не отримав подальшого розвитку.

ВИСНОВКИ

Нітридна кераміка є проміжною між оксидними і оксидно-карбідними кераміками. Так, за ступенем окислення у разі динамічного нагрівання нітридна кераміка знаходиться між оксидними кераміками, що майже не окислюються до температур у 1673 К, та оксидно-карбідними, що активно окислюються після 1373 К. Також за рівнем температури у зоні обробки під час шліфування нітридна кераміка є проміжною між оксидними і оксидно-карбідними кераміками, аналогічно і за силовими показниками процесу алмазного шліфування. Водночас за цими показниками вона більше подібна до оксидно-карбідних керамік.

Встановлено, що під час обробки різних керамік шлам має частинки різної зернистості, причому зустрічаються достатньо крупні частинки шламу, які є наслідком як виколот оброблюваного матеріалу, так і компактування шламу. Нітридна або оксидна кераміки мають переважно компактовані частинки розміром від 32 до 128 мкм, більша частина яких має діапазон 96–128 мкм. Для змішаної оксидно-карбідної кераміки переважно фіксують частинки шламу у цьому ж діапазоні, але пік зернистості компактів знаходиться в меншому діапазоні. За вмістом частинок шламу як у діапазоні до 3 мкм, так і у більшому діапазоні (32–96 мкм) нітридна кераміка є проміжною між оксидною та оксидно-карбідною кераміками.

Встановлено, що найменшу енергоємність шліфування має оксидна кераміка, оксидно-карбідна кераміка – у 2–3 рази більшу, а найбільшу має нітридна кераміка як за умов пружного, так і за глибинного шліфування. Енергія руйнування нітридної кераміки є найвищою – 40 Дж/м², що в 3 рази більше, ніж оксидних та оксидно-карбідних керамік. Тобто, тенденції зміни даних за питомою енергоємністю шліфування та питомою енергією руйнування співпадають, але саме нітридна кераміка має найвищу серед інших керамік питому

енергоємність шліфування, що і є найбільш принциповою особливістю алмазної обробки таких нітридних керамік.

Показано, що коефіцієнт абразивного різання, який в значній мірі визначає і коефіцієнт тертя, у разі шліфування нітридної кераміки дорівнює 0,2. Підтверджено, що керамічні кульки з Si_3N_4 мають у порівнянні із іншими керамічними кульками меншу інтенсивність зносу під час тертя, але і коефіцієнт тертя в них вищий.

Карбідна кераміка має менший коефіцієнт тертя, ніж нітридна, але нітридна є більш тепло- і зносостійкою, тому варто використовувати в керамічних кульках сполучення $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$. Дослідження алмазного шліфування такого матеріалу показало, що шлам змішаних нітридно-карбідних керамік $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{B}_4\text{C}$ не компактується і є найбільш дрібнодисперсним. Як наслідок, змішана нітридно-карбідна кераміка має найменший, навіть у порівнянні із оксидною керамікою, коефіцієнт абразивного різання, а відтак і найменший коефіцієнт тертя. Тобто, таку змішану кераміку можна застосовувати у керамічних кульках для підшипників, але під час її шліфування з доданням карбіду бору необхідно прикладати значно більші нормальні зусилля, наближені до тих, що застосовують під час шліфування оксидної кераміки, особливо за умов пружного шліфування, характерного для обробки керамічних кульок.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не фінансували із зовнішніх джерел.

V. I. Lavrinenko

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Silicon nitride as a ceramic material of technical application:
features of its diamond processing and its place among
other ceramics

Nitride ceramics (Si_3N_4) are exceptional functional materials that are distinguished by their excellent properties, such as low density, high hardness and corrosion resistance, as well as wear resistance compared to other ceramic materials. This determines its effectiveness in technical applications such as balls for high-quality ceramic ball bearings and tribological tests, as well as an effective tool material. This article examines the features of diamond processing of silicon nitride ceramic products, which are absent in known studies. It is shown that nitride ceramics are intermediate between oxide and oxide-carbide ceramics in terms of oxidation degree, temperature level in the processing zone during grinding, and power indicators of the diamond grinding process of ceramic materials. At the same time, it was found that, in terms of the specific energy intensity of grinding, oxide ceramics have the lowest energy intensity for their processing. Oxide-carbide ceramics, in comparison with them, have 2–3 times higher grinding energy intensity, and nitride ceramics have the highest grinding energy intensity, both under deep grinding conditions and under elastic grinding conditions, which should be kept in mind when determining the processing conditions for nitride ceramic products.

Keywords: silicon nitride, tool ceramics, diamond grinding, ceramic balls, specific energy intensity of grinding.

1. Chen F., Sun X., Fang B., Yan K., Hong J., Yan B. Tribological behavior and electrical insulation properties of micro-and nanoscale graphene/ β - Si_3N_4 whisker-reinforced Si_3N_4 ceramics at low temperature. *J. Mater. Res. Technol.* 2025. Vol. 36, May–June. P. 1813–1821.
2. Sokhan' S.V., Voznyy V.V., Sorochenko V.H. Diamond grinding of ceramic balls based in a groove with circular feed under oscillation. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 4. P. 311–323.

3. Ardila M.A.N. Costa H.L., de Mello J.D.B. Influence of the ball material on friction and wear in microabrasion tests. *Wear*. 2020, Vol. 450–451, art. 203266.
4. Hashimoto M., Kanda K. Mechanism of low friction coefficient of carbide ceramics and carbon-containing steels. *Precis. Eng.* 2023. Vol. 79, January, P. 1–6.
5. Sun X., Liu B., Zhang Sh., Wang X., Zhao S., Dai W., Tu J. Tribological behavior of polycrystalline diamond compacts under alternating high and low temperature conditions in vacuum environment. *Tribol. Int.* 2025, Vol. 203, March, art. 110404.
6. Gou R., Zhao J., Luo X. Tribological behavior of PDC-CR at different temperatures. *Diam. Relat. Mater.* 2024. Vol. 144, art. 110950.
7. Liu N., Lei L., Lu H., Jiang H., Zhang Y., Xiao J., Zhang J., Chen X., Xu J. C–C bond rupture initiated graphitization achieves highly efficient diamond polishing. *Int. J. Mech. Sci.* 2025. Vol. 287, art. 109958.
8. Cui X., Qin Y., Han X., Chen H., Ruan X., Zhang H., Jiao Ch., Mao R., Hao J., Zhao S., Hou Sh., Pian X., Wang Ya., Nishimura K., Deng L., Jiang N. Comparing the tribological behavior of polycrystalline diamonds against steel GCr15 and ceramic Si₃N₄: friction and wear. *Diam. Relat. Mater.* 2024. Vol. 141, January, art. 110550.
9. Zhou F., Jin Y., Shao Q., Yao W., Wang H. Surface roughness and material removal of Si₃N₄ cylindrical rollers using double-side grinding with diamond film pads. *J. Mater. Res. Technol.* 2025. Vol. 34, January–February. P. 2788–2801.
10. Лаврінченко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / під заг. ред. акад. НАН України М.В. Новікова. Київ: ІНМ НАН України, 2013. 456 с.
11. Lavrinenko V.I. To the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2022, Vol. 44, no. 4. P. 285–291.
12. Lavrinenko V.I. Abrasive cutting factor as a characteristic reflecting the performance parameters of superabrasive grinding. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 1. P. 40–46.
13. Shepelev A.A., Lavrinenko V.I., Bodnaruk N.I., Shklyarenko V.V., Laznyuk V.D. Diamond grinding of silicon nitride- and boron carbide-based ceramic materials. *Sverkhtverdye Materialy*. 1994, no. 3. P. 43–47.

Надійшла до редакції 01.07.25

Після доопрацювання 10.10.25

Прийнята до опублікування 15.10.25