

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.922:621.793

В. І. Лавріненко

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

lavrinen52@gmail.com

Оксид бору на поверхні зерен з надтвердих матеріалів як можливий чинник підвищення експлуатаційних показників шліфувального інструменту

Досліджено вплив наявності на поверхні зерен надтвердих матеріалів оксиду бору на експлуатаційні показники шліфувального інструменту. Показано можливість збільшення показника міцності зерен кубічного нітриду бору (КНБ) за допомогою термообробки зерен на повітрі за невеликої температури завдяки заповненню їхнього дефектного простору плівкою B_2O_3 . Результати випробувань засвідчили, що круги, які містили порошок КНБ після термообробки, мали вищу зносостійкість та меншу питому енергоємність шліфування. Показано, що саме наявність оксиду бору на поверхні зерен шліфпорошків надтвердих матеріалів є важливим чинником підвищення їхніх експлуатаційних показників в шліфувальному інструменті.

Ключові слова: оксид бору, оксид алюмінію, зерна кубічного нітриду бору, зерна алмазу, шліфувальний інструмент, експлуатаційні показники.

Кисень в процесах різання є важливим чинником зміни триботехнічних характеристик контактних поверхонь. Оксидні шари, що виникають під дією кисню або його сполук на контактних поверхнях, у значній мірі впливають на процеси тертя та зношування [1]. На це звертали увагу під час дослідження процесів алмазно-абразивної обробки [2], але більшу увагу приділяли додатковому впливу на різальну поверхню круга з метою збільшення вмісту кисеньвмісних матеріалів або введенню таких у склад зв'язуючого матеріалу. Водночас, експлуатаційні показники шліфувального інструменту з надтвердих матеріалів (НТМ), як алмазів, так і кубічного нітриду бору (КНБ), значно залежать від якості зерен шліфпорошків, що застосовують для його виготовлення, і, насамперед, від стану їхньої поверхні. Стан поверхні шліфпорошків НТМ може змінюватися внаслідок їхньої термообробки на повітрі [3] або через примусову модифікацію поверхні зерен

[4], що дозволяє отримати оксиди на їхній поверхні, які потрапляють безпосередньо в зону обробки. Функції, що повинні виконувати оксиди в зоні обробки, є наступними [2]: гальмування процесу окиснення алмазу та змінювання процесу тертя в зоні обробки. В [5] було проаналізовано низку оксидів і визначено такі, що зможуть ефективно реалізувати подібні функції, це B_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 і Al_2O_3 .

В [6] алмазні частинки покривали оксидом алюмінію методом атомно-шаруватого осадження, внаслідок чого температура початку окиснення алмазу до CO_2 змістилася в бік більших (на ~ 50 град) значень через захисну дію Al_2O_3 . Автори [6] стверджують, що хоча покращення є доволі малим для застосування у високотемпературних процесах, але ці результати свідчать, що таке захисне покриття можна застосовувати для захисту алмазу від окиснення.

В [7] досліджено окиснення чистих алмазних порошків і порошків, що містять 0,2 % (за масою) бору. Встановлено, що аналогічний ступінь окиснення змістився з 773 °C для чистого алмазу до 1118 °C для алмазу, легованого бором. SEM-аналіз поверхні окиснених алмазів засвідчив, що навіть такого низького вмісту бору достатньо для утворення захисного шару B_2O_3 в областях, де відбувалося активне окиснення.

Це знайшло підтвердження у [8], де досліджено захисні покриття з $Ti-B-C$ на алмазних частинках. Результати засвідчили, що саме вміст бору є важливим для адгезії покриття $Ti-B-C$ до алмазу. Таке покриття з вмістом бору 60 % (ат.) захищало алмаз від окиснення більше 1 год у разі нагріву до 1000 °C на повітрі. Тобто, оксиди грають дуже важливу роль. Так, у разі відпалу алмаза з покриттям в повітрі апріорі утворені B_2O_3 та TiO_2 захищали алмаз від окиснення як кисеньнепроникні шари. Крім того, за допомогою утворення B_2O_3 вдалося уникнути розшарування TiO_2 , викликаного об'ємним розширенням під час окиснення. Так само наявність TiO_2 забезпечила тривалий захист завдяки зменшенню швидкості випаровування B_2O_3 [8].

У [9] було вказано на зв'язок між хлоридом натрію $NaCl$ та оксидом бору B_2O_3 . Досліджено вплив добавки $NaCl$ на якість і вихід B_4C , синтезованого карботермічним відновленням з порошкової суміші H_3BO_3-C (кокс). Цікавим є те, що механізм дії $NaCl$ полягає не в хімічному, а у фізичному впливі на випаровування B_2O_3 . Добавка $NaCl$ сприяє деполімерізації складної мережевої структури B_2O_3 і ефективно (на ~ 73 %) знижує її в'язкість. Це полегшує масоперенос, покращує кінетику реакції і тим самим підвищує вихід B_4C .

Наведені вище публікації [6–9] вказують на позитивну дію таких оксидів, як TiO_2 , Al_2O_3 та B_2O_3 , що збігається з висновками [5].

В даній роботі основну увагу зосереджено на забезпеченні наявності на поверхні зерен шліфпорошків надтвердих матеріалів саме таких оксидів як можливого чинника підвищення експлуатаційних показників шліфувального інструменту з НТМ та пошук більш ефективного оксиду.

Примусову спрямовану модифікацію поверхні зерен порошків синтетичного алмазу проводили ізотермічним методом рідиннофазного нанесення з насичених розчинів як оксидів (B_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2), карбіду (B_4C), так і їхніх сумішей. Більш детально процес модифікації поверхні зерен викладено у [4]. Для перевірки власних та літературних даних [6–9], викладених вище, розглядали наступні варіанти модифікації поверхні зерен марки АС6 зернистістю 125/100: B_2O_3 [7], $B_2O_3 + Al_2O_3$ [6], $B_2O_3 + TiO_2$ [8], $B_2O_3 + B_4C$ [9].

Модифіковані шліфпорошки було використано для виготовлення шліфувальних кругів форми 12А2-45° розміром $125 \times 40 \times 5 \times 3 \times 32$ мм на полімерній зв'язці В2-08. Для обробки було вибрано важкооброблюваний вольфрамо-титано-

кобальтовий твердий сплав марки T15K6 з розмірами зразка 63×15×7 мм. Режими шліфування були наступними: швидкість обертання круга – 18 м/с; поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід; повздовжня подача – 0,57 м/хв (для продуктивності обробки 200 мм³/хв) та 1,14 м/хв (для продуктивності обробки 400 мм³/хв). Шліфування провадили без охолодження. Оцінювали зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат алмазів q та шорсткість обробленої поверхні за показником Ra . Результати випробувань наведено в табл. 1 (у [10] було використано більший набір варіантів модифікації поверхні алмазних зерен, але у даній роботі автора цікавили саме найкращі варіанти з наявністю вказаних вище оксидів, а також карбиду бору як чинника, що зменшує окиснення алмазних зерен).

Аналіз даних табл. 1 свідчить, що лише два варіанти модифікації поверхні алмазних зерен із наявністю оксиду бору є ефективними: $B_2O_3 + Al_2O_3$ та $B_2O_3 + B_4C$. Інші варіанти є нестабільними, з невеликою ефективністю та істотно залежними від продуктивності шліфування. Також проста модифікація поверхні алмазних зерен оксидом бору фактично не дає ефекту. Тобто висновки [7] та [8] не було підтверджено, а більш реальним виявився висновок у [6], де на поверхні алмазних зерен виявили оксид бору в суміші з оксидом Al_2O_3 , а зносостійкість алмазних кругів підвищилася у 2,2–2,4 рази.

Таблиця 1. Експлуатаційні показники алмазних шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен 100 % із різними варіантами модифікації поверхні алмазних зерен марки АС6 125/100

Модифікація поверхні зерен сумішшю	Продуктивність обробки:			
	200 мм ³ /хв		400 мм ³ /хв	
	q , мг/г	Ra , мкм	q , мг/г	Ra , мкм
$B_2O_3 + Al_2O_3$	7	0,37	17	0,43
$B_2O_3 + B_4C$	12	0,35	21	0,37
$B_2O_3 + TiO_2$	21	0,30	24	0,37
B_2O_3	25	0,45	32	0,49
Без модифікації	16,5	0,36	37	0,50

Надалі було розглянуто варіанти модифікації поверхні зерен іншого надтвердого матеріалу – кубічного нітриду бору. Оскільки у літературних джерелах не було знайдено даних стосовно модифікації поверхні зерен cBN, то порівнювали висновки у [9], які опосередковано відносяться до cBN – хоча було розглянуто поверхню B_4C , але це борвмісний матеріал і, в певній мірі, його можна віднести до надтвердих [11]. Саме тому розглядали узагальнені наступні варіанти модифікації поверхні алмазних зерен марки KB зернистістю 125/100, користуючись висновками [9]: оксид бору – B_2O_3 , суміш оксиду і карбиду бору – $B_2O_3 + B_4C$, суміш оксиду бору і хлориду натрію – $B_2O_3 + NaCl$, а також суміш оксидів бору та алюмінію – $B_2O_3 + Al_2O_3$ (див. висновки [6]) та сумішшю двох оксидів – $B_2O_3 + TiO_2$ (на це також наштотували висновки [8]). Примусову спрямовану модифікацію поверхні зерен порошоків кубічного нітриду бору проводили ізотермічним методом [4] рідиннофазного нанесення з насичених розчинів як оксидів (B_2O_3 , Al_2O_3), карбиду (B_4C), хлориду ($NaCl$), так й їхніх сумішей.

Модифіковані шліфпорошки було використано у процесі виготовлення шліфувальних кругів форми 12A2-45° розміром 125×40×5×3×32 мм на полі-

мерній зв'язці В2-08. Для обробки було вибрано швидкорізальну сталь марки Р6М5, розміри зразка були 100×20×8 мм. Режими шліфування: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,50 м/хв (для продуктивності обробки 100 мм³/хв) та 1 м/хв (для продуктивності обробки 200 мм³/хв). Шліфування проводили без охолодження. Оцінювали зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат кубоніту q та шорсткість обробленої поверхні за показником Ra (у [12] результати викладено для більший варіантів модифікації поверхні кубонітових зерен, але автором розглянуто найкращі варіанти з наявністю вказаних вище оксидів, а також В₄С та NaCl). Результати випробувань наведено у табл. 2.

Аналіз даних табл. 2 свідчить про наступне. У разі невеликої (100 мм³/хв) продуктивності модифікація поверхні КНБ сумішшю В₂О₃ + Al₂О₃ маємо найбільший ефект (підвищення зносостійкості кругів у 1,6 рази), дещо менший, але близький ефект (підвищення зносостійкості кругів у 1,5 рази) дає модифікація сумішшю В₂О₃ + NaCl, що підтверджує висновки [9]. Модифікація поверхні КНБ тільки оксидом В₂О₃ також підвищує у 1,3 рази зносостійкість кругів, але у разі збільшенні у два рази продуктивності шліфування найбільше підвищення показників шліфувального інструменту спостерігали у разі модифікації поверхні зерен КНБ оксидом В₂О₃. Тобто, за підвищених навантажень в зоні обробки найбільш ефективним є оксид бору.

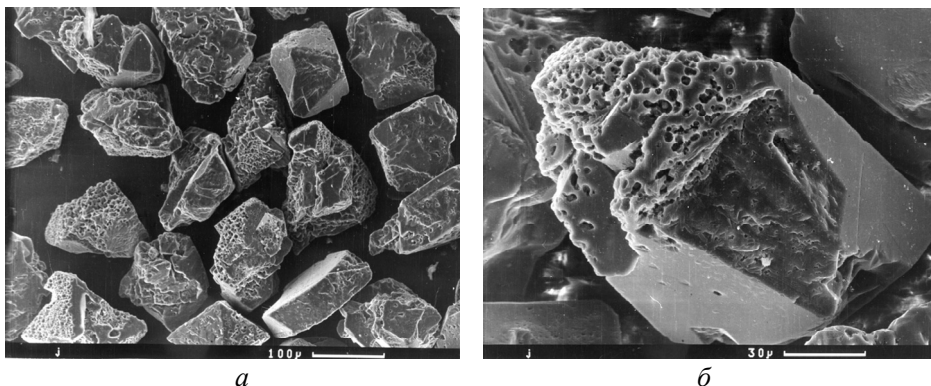
Таблиця 2. Експлуатаційні показники кубонітових шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен 100 % із різними варіантами модифікації поверхні кубонітових зерен марки KB 125/100

Модифікація поверхні зерен сумішшю	Продуктивність обробки, мм ³ /хв			
	100		200	
	q , мг/г	Ra , мкм	q , мг/г	Ra , мкм
В ₂ О ₃ + Al ₂ О ₃	0,73	0,29	2,18	0,34
В ₂ О ₃ + NaCl	0,79	0,31	2,80	0,44
В ₂ О ₃	0,90	0,23	2,15	0,42
В ₂ О ₃ + В ₄ С	1,23	0,50	2,21	0,72
Без модифікації	1,18	0,46	2,58	0,63
В ₂ О ₃ + TiO ₂	1,53	0,59	2,91	0,70

Аналіз табл. 2 дозволяє зробити висновок, що модифікувати поверхню зерен КНБ сумішами В₂О₃ + TiO₂, В₂О₃ + NaCl, В₂О₃ + Al₂О₃ та В₂О₃ + В₄С є недоцільним через відсутність сталого позитивного ефекту, а також ускладнення самого процесу модифікації. Спрямована модифікація поверхні зерен КНБ саме оксидом В₂О₃ є найбільш доцільною, оскільки позитивний ефект є стабільним як для низької, так і для підвищеної продуктивності шліфування. Наведене вище дозволяє зробити висновок, що для зерен кубічного нітриду бору цілком достатньою є модифікація їхньої поверхні оксидом бору.

На позитивну дію В₂О₃ на поверхню шліфувальних зерен було звернено увагу під час дослідження кубічного нітриду бору [13], де відзначено особливості морфології зерен КНБ (раніше на це не звертали уваги). Як свідчить аналіз, ступінь дефектності поверхні зерен КНБ є достатньо великою (рисунок), тому дія оксиду бору може бути позитивною.

Відомо [14], що зерна КНБ є достатньо стійкими до впливу кислот и не піддаються окисленню за досить високих температур, тому, здавалося, важко очікувати змін їхніх властивостей з часом, а діапазон температур до 1000 °С дослідників не цікавив. Але, як встановлено дослідженнями автора, відбувається зміна показника міцності (руйнівного навантаження) зерен шліфпорошку КР 100/80, який після виготовлення тримали у запакованій тарі (вихідний), далі утримували на повітрі 180 + 250 дб (табл. 3). Показник міцності вихідного порошку після витримки на повітрі спочатку підвищувався, а після подальшої витримки зменшувався і повертався до практично вихідних значень (див. табл. 3). Теж саме відбувалося і для рекуперованого порошку, і для вихідного після попередньої хімічної обробки (див. табл. 3).



Дефектність поверхні зерен шліфпорошку КНБ марки КР 125/100 (а) та окремого зерна (б).

Таблиця 3. Вплив часу витримки і умови отримання на показник міцності зерен порошку марки КР 100/80

Умови отримання порошку КР 100/80	Руйнівне навантаження зерен порошку, Н		
	початковий стан	після 180 дб	після 180 + 250 дб
Вихідний	4,56	6,53	4,58
Рекуперований з робочого шару круга КР 100/80–МО20–2–100	3,57	4,97	3,61
Вихідний, але після хімічної обробки за режимами і умовами рекуперації порошку КНБ з робочого шару круга	3,98	6,59	4,80

Дані табл. 3 свідчать, що навіть за кімнатної температури на поверхні зерен КНБ з часом відбуваються процеси, які надалі здатні підвищити їхню міцність. На думку автора, ці процеси відбуваються так: після того, як запакований шліфпорошок кубоніту розпакували, кисень повітря поступово взаємодіє з сBN і створює в дефектах та порах, яких багато в зернах шліфпорошку КНБ (див. рисунок), склоподібну плівку V_2O_5 . Вона заповнює дефекти і підвищує показник міцності зерен. З часом ця плівка поступово випаровується (ймовірно цьому може сприяти наявність у повітрі парів води і міцність зерен повертається у вихідний стан. Це є характерним як для вихідних зерен, так і рекуперованих з кубонітовмісного шару круга. Такий процес є тривалим і практично не може позначитися на підвищенні експлуатаційних показників вихідних зерен, оскі-

льки їх або відразу після отримання застосовують в шліфувальному інструменті, або зберігають у гарно закритій тарі зі зниженим доступом кисню, що збільшує період утворення плівки V_2O_3 .

Для прискорення процесу формування на поверхні зерен КНБ плівки V_2O_3 та заповнення дефектів в зернах КНБ склоподібним V_2O_3 за достатньо короткий час було розглянуто особливості термічної обробки зерен КНБ. Прийнято вважати температуру 800 °С граничною, за якої відбувається зниження міцності зерен [14], тому дослідники практично не вивчали поведінку сВН за температур до 800 °С. Але з наведеного вище видно, в цьому діапазоні температур міцність зерен не зменшується, а можуть відбуватися зміни на поверхні через наявність кисню повітря і підвищену температуру. В табл. 4 наведено експериментальні дані за показником міцності (руйнівного навантаження) зерен порошку марки КР 100/80 від температури термообробки у разі витримки 30 хв (попередньо встановлено, що інтервал термообробки зерен знаходиться в межах 30 хв). За невеликих температур (200–600 °С) відбувається підвищення показника міцності зерен, і це підтверджує припущення автора.

Таблиця 4. Вплив температури термообробки на показник міцності зерен порошку марки КР 100/80

Температура термообробки, °С	20	200	300	600	800	1000	1200
Показник міцності зерен, Н	4,56	5,35	5,72	4,68	4,50	3,41	2,28

Термічна обробка порошків КНБ (КР, КВ) на повітрі в межах 200–300 °С дозволяє підвищити значення руйнівного навантаження їхніх зерен. Так, наприклад, показник міцності зерен кубоніту марки КВ 100/80 після термообробки за температури 300 °С підвищився з 5,3 до 6,4 Н.

Свідченням того, що за даного способу обробки КНБ саме оксиди відіграють захисну роль і сприяють зміцненню, є той факт, що нагрів у спектрально чистому гелії, у якому відсутній кисень, не сприяв підвищенню показника міцності зерен. Крім того, встановлено, що під час термообробки металізованих порошків КР 100/80 (нікелем) характер поведінки показника міцності до температури 900 °С є незмінним. Тобто, доступ кисню до поверхні зерен тут є обмеженим і, як наслідок, показник міцності зерен металізованих порошків не змінюється. Наведені вище дослідження засвідчили можливість підвищення міцності зерен КНБ завдяки заповненню дефектного пористого простору зерен КНБ плівкою V_2O_3 внаслідок термообробки зерен на повітрі за невеликих температурах. Більш детально цей ефект описано у [15].

Автором було досліджено, як спрямована термообробка зерен КНБ впливає на експлуатаційні показники шліфувальних кругів. Було висунуто припущення, що оскільки під час виготовлення робочого шару кругів наважка термооброблених зерен, із наявністю на їхній поверхні оксиду бору, буде оточена шихтою зв'язуючого матеріалу, то це дозволить уникнути втрат оксиду бору під час спікання. Наважку порошку кубоніту КР 100/80 розділили на дві частини: одну (контрольну) залишили без термообробки, а іншу термообробляли на повітрі за температури 300 °С протягом 30 хв. Як наслідок, показник міцності зерен порошку КР 100/80 збільшився у 1,3 рази. Після цього, з кожною частиною зерен виготовили круги 12А2-45° 150×5×3×32–КР 100/80–МО20-2–100 і провели їхнє випробування у процесі шліфування швидкокорізальної сталі Р6М5 різними методами з продуктивністю шліфування 300, 450 та 750 мм³/хв. Результати випробувань засвідчили (табл. 5), що кру-

ги, які містили порошок КНБ після термообробки, мали більшу зносостійкість та меншу питому енергоємність шліфування (розраховано згідно [16]).

Таблиця 5. Вплив термообробки (ТО) порошків кубоніту на експлуатаційні показники під час шліфування сталі Р6М5

Порошок КНБ	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати КНБ під час шліфування, мг/г	Питома енергоємність шліфування, кДж/кг
Шліфування з охолодженням			
$Q = 300 \text{ мм}^3/\text{хв}$			
КР 100/80	0,50	0,70	80,5
КР 100/80 ТО	0,50	0,41	47,1
$Q = 450 \text{ мм}^3/\text{хв}$			
КР 100/80	0,75	0,75	86,2
КР 100/80 ТО	0,80	0,44	53,9
$Q = 750 \text{ мм}^3/\text{хв}$			
КР 100/80	1,0	1,31	120,5
КР 100/80 ТО	1,0	0,98	90,1
Електрохімічне шліфування			
$Q = 750 \text{ мм}^3/\text{хв}$			
КР 100/80	0,65	3,50	209,2
КР 100/80 ТО	0,65	2,70	161,4
Електроерозійне шліфування			
$Q = 750 \text{ мм}^3/\text{хв}$			
КР 100/80	0,80	4,10	301,6
КР 100/80 ТО	0,80	2,90	213,3

У разі збільшення навантаження в зоні обробки позитивний ефект від наявності плівки V_2O_3 на поверхні зерен КНБ зменщується (на це було звернуто увагу вище під час аналізу табл. 2). Так, наявність на поверхні і в дефектах поверхні зерен КНБ плівки V_2O_3 дозволяє за невеликої (300–450 $\text{мм}^3/\text{хв}$) продуктивності шліфування зменшити у 1,7 рази витрати зерен КНБ в крузі та у 1,6–1,7 рази енергоємність шліфування. У разі збільшення продуктивності шліфування до 750 $\text{мм}^3/\text{хв}$ цей ефект стає вже меншим (тільки 1,3–1,4 рази) і фактично відповідає вказаному вище підвищенню міцності термооброблених зерен у 1,3 рази.

ВИСНОВКИ

Наявність оксиду бору на поверхні зерен шліфпорошків надтвердих матеріалів є важливим чинником підвищення їхніх експлуатаційних показників в шліфувальному інструменті.

Водночас за своїми функціями дія оксиду бору для зерен КНБ та алмазів різнилася. Так, для зерен КНБ використання V_2O_3 є засобом заліковування дефектів зерен та доставки кисеньвмісного матеріалу в зону обробки. Останнє, за невеликої продуктивності шліфування, може бути посилено додаванням оксиду алюмінію.

Для алмазів також має значення доставка кисеньвмісних матеріалів в зону обробки, але із підвищенням продуктивності шліфування вже більше значен-

ня для алмазів має захист алмазів від окиснення, і саме за допомогою оксиду алюмінію у поєднанні з оксидом бору є кращим.

Слід мати на увазі, що використання B_2O_3 має часове обмеження для зерен КНБ, бо він є нестабільним, і у разі нанесення його на поверхню зерен шліф-порошку НТМ останній необхідно застосовувати для виготовлення шліфувального інструменту негайно.

Крім того, слід враховувати і те, що у разі збільшення продуктивності шліфування і, як наслідок, підвищення температури в зоні обробки, оксид бору також буде нестабільним. Водночас в нестабільності оксиду бору є позитив, адже його можна розглядати як тверде змащення в зоні шліфування.

ФІНАНСУВАННЯ

Ця робота була підтримана постійним інституційним фінансуванням. Жодних додаткових грантів для проведення або керівництва цим дослідженням отримано не було.

V. I. Lavrinenko

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Boron oxide on the surface of grains from superhard materials as a possible factor in increasing the performance of grinding tools

The influence of the presence of superhard boron oxide materials on the surface of the grains on increasing the performance of the grinding tool was studied. The possibility of increasing the strength index of cubic boron nitride (cBN) grains using heat treatment of grains in air at low temperatures due to filling their defective space with a B_2O_3 film is shown. The results of the tests proved that the wheels, which contained cBN powder after heat treatment, had higher wear resistance and lower specific grinding energy. It is shown that the presence of boron oxide on the surface of grinding powder grains of superhard materials is an important factor in increasing their performance in the grinding tool.

Keywords: boron oxide, aluminum oxide, cubic boron nitride grains, diamond grains, grinding tool, performance indicators.

1. Костецкий Б.И., Никулин Г.В. Роль кислорода при действии добавок поверхностно-активных веществ в процессах трения, смазки и износа металлов. *ДАН СССР*. 1968. Т. 181, № 2. С. 331–334.
2. Lavrinenko V.I., Solod V.Yu. Oxidation of oxide materials in the machining zone in superabrasive grinding—a factor of influence on the grinding performance. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 6. P. 417–422.
3. Лавріненко В.І., Солод В.Ю., Ільницька Г.Д., Смоквина В.В., Кашинський І.С. Дослідження теплового впливу на зміну поверхневого шару алмазів і супутніх інструментальних матеріалів (Огляд). *Зб. наук. праць ДДТУ (технічні науки)*. 2023. Т. 2, № 43. С. 39–55.
4. Lavrinenko V.I., Bochechka O.O., Poltoratskyi V.G., Smokvyna V.V., Solod V.Yu. Improving the performance of diamond grinding tool by modifying the synthetic diamond surfaces. *Sci. Innov.* 2024. Vol. 20, no. 1. P. 3–14.
5. Lavrinenko V.I., Solod V.Yu., Kashynskiy I.S., Dobroskok V.L. Determination of oxides intended for the surface modification of diamond grains by the functional characteristics. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 6. P. 417–422.
6. Dominguez D., Tiznado H., Borbon-Nuñez H.A., Muñoz-Muñoz F., Romo-Herrera J.M., Soto G. Enhancing the oxidation resistance of diamond powder by the application of Al_2O_3 conformal coat by atomic layer deposition. *Diam. Relat. Mater.* 2016. Vol. 69. P. 108–113.
7. Herrmann M., Matthey B., Gestrich T. Boron-doped diamond with improved oxidation resistance. *Diam. Relat. Mater.* 2019. Vol. 92. P. 47–52.

8. Sun Y., Zhang Ch., Wu J., Meng Q., Liu B., Gao K., He L. Enhancement of oxidation resistance via titanium boron carbide coatings on diamond particles. *Diam. Relat. Mater.* 2019. Vol. 92. P. 74–80.
9. Li X., Wang Sh., Nie D., Liu K., Yan Sh., Xing P. Effect and corresponding mechanism of NaCl additive on boron carbide powder synthesis via carbothermal reduction. *Diam. Relat. Mater.* 2019. Vol. 97, art. 107458.
10. Lavrinenko V.I., Poltoratskyi V.G., Pasichnyi O.O., Solod V.Yu. Using diamond grinding powders with combined coatings on diamond grain surfaces in abrasive tools. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 3. P. 238–243.
11. Кислый П.С., Кузенкова М.А., Боднарук Н.И., Грабчук Б.Л. Карбид бора. Киев: Наук. думка, 1988. 216 с.
12. Lavrinenko V.I., Poltoratskyi V.G., Pasichnyi O.O., Solod V.Yu. Performance indicators of the grinder tools with cubic boron nitride grains with combined wear-resistant coatings. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 4.
13. Лавриненко В.И., Солод В.Ю., Смоквина В.В. Особенности морфологии порошков из кубического нитрида и их направленное использование в шлифовальном инструменте. *Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць НТУ "ХПІ"*. Вип. 8. Харків: НТУ "ХПІ", 2013. С. 56–65.
14. Эльбор в машиностроении / под ред. В.С. Лысанова. Ленинград: Машиностроение, 1978. 280 с.
15. Лавріненко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2013. 456 с.
16. 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.

Надійшла до редакції 29.03.24

Після доопрацювання 15.05.24

Прийнята до опублікування 20.05.24