

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.923

**В. І. Лавріненко^{1,*}, В. Г. Полторацький¹, О. О. Пасічний¹,
В. Ю. Солод^{2,**}**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

²Дніпровський державний технічний університет,
м. Дніпро, Україна

*lavrinen52@gmail.com

**v_solod@ukr.net

Застосування в шліфувальному інструменті алмазних шліфпорошків з комбінованими покриттями на поверхні алмазних зерен

Розроблено технологічний процес для формування покриттів на поверхні алмазних зерен з двох та трьох компонентів: з розчинного оксиду B_2O_3 та нерозчинного оксиду Al_2O_3 або нерозчинного карбїду (B_4C , SiC , TiC). Встановлено, що для досягнення гарантованого збільшення зносостійкості алмазних зерен покриття з оксиду та карбїду бору ($B_2O_3 + B_4C$). Позитивна дія такого покриття поверхні алмазних зерен більше проявляється за підвищених силових і теплових навантажень в зоні шліфування. Тримальна здатність обробленої шорсткої поверхні за параметром кривої опорної поверхні $t50$ є кращою у разі покриття поверхні зерен шліфпорошків алмазів АС6 І25/100 сумішшю $B_2O_3 + B_4C$. Тобто, для алмазних зерен, як з врахуванням зносостійкості алмазних кругів, так і показників шорсткої поверхні, рекомендовано застосовувати в кругах під час шліфування твердих сплавів алмазні зерна з покриттям їхньої поверхні сумішшю $B_2O_3 + B_4C$.

Ключові слова: комбіноване захисне покриття, алмазні шліфпорошки, поверхня алмазних зерен, зносостійкість алмазних кругів, шорсткість обробленої поверхні.

Експлуатаційні характеристики алмазного шліфувального інструменту у значній мірі залежать від якості алмазів, що застосовують для його виготовлення. Покриття зерен алмазу є одним з важливих факторів впливу на зміну його властивостей та підвищення утримання у зв'язці робочого шару шліфувального круга.

У сучасних наукових публікаціях звертають увагу на розробку різних захисних комбінованих оксидних та карбідних покриттів на алмазних зернах, які дозволяють підвищити їхню стійкість під час застосування у шліфувальному інструменті.

Так, в [1] алмазні частинки покривали оксидом алюмінію (Al_2O_3) методом атомно-шаруватого осадження. Внаслідок захисної дії Al_2O_3 збільшилася на ~ 50 К температура, за якої починається перетворення алмазу до CO_2 . Автори [1] стверджують, що хоча значення такого прирощення температури є невеликим, але все ж ці результати свідчать, що таке захисне покриття можна застосовувати для захисту алмазу від окиснення. Рациональне управління міжфазними електронними станами Al_2O_3 /алмаз розглянуто і в [2], де розрахунки теорії функціональної щільності застосовано для з'ясування впливу Al_2O_3 та алмазу на електронні властивості межі розділу Al_2O_3 /алмаз. Результати свідчать, що двовимірний дірковий газ може бути створено на гетеро-межі $\text{Al}_2\text{O}_3(001)/\text{C}(001)$. Так, для найбільш сталого C–Al розділу на межі за умов підвищеного вмісту Al, досягали сильного легування *p*-типу з очевидними характеристиками локалізації через перенос заряду, що генерується на межі C–Al [2].

В [3] для визначення особливостей реакції алмазу з різними металами і оксидами металів енергію активації реакції між алмазом і металами, а також між алмазом і оксидами металів було розраховано з перших принципів. Для перехідних металів 4 періоду Періодичної системи елементів під час їхньої взаємодії з алмазом і утворення відповідних карбідів металів енергії активації збільшується в ряду: Mn, Fe, V, Ti, Cr, Co, Ni, Zn, Cu. Коли алмаз реагує з оксидами з утворенням металів і CO, то розрахункова енергія активації зменшується в ряду: MnO, FeO, CoO, NiO, CuO. Встановлено, що NiO і CuO відновлюються вуглецем алмазу до Ni і Cu, що свідчить про те, що між алмазом і оксидами металів відбувається окислювально-відновлювальна реакція.

В [4] у полірувальному інструменті поверхня алмазних зерен була модифікована за допомогою нанесення шару SiO_2 методом ізотермічного гідролізу і водночас тонка плівка SiO_2 була рівномірно привитою до поверхні алмазу. Випробування свідчать, що інструменти з алмазних абразивів, модифікованих SiO_2 , мають більш високу швидкість знімання матеріалу і кращу якість полірування SiC-підкладок, ніж немодифіковані алмазні абразиви. Це викликано збільшенням диспергувальної здатності зерен абразиву та покращенням зчеплення між матрицею плівки і абразивами [4]. Це знайшло підтвердження і в [5], де було досліджено захисні покриття з карбіду титану–бору на алмазних частинках. Результати засвідчили, що вміст бору є важливим для адгезії Ti у покритті Ti–B–C. Таке покриття з вмістом бору 60 % (ат.) захищало алмаз від окиснення більше 1 год у разі нагріву до 1000 °C на повітрі. У разі відпалу алмазу з покриттям априорі утворені на повітрі V_2O_3 та TiO_2 захищали алмаз від окиснення як кисневонепроникні шари. Крім того, утворенням рідкого V_2O_3 вдалося уникнути розшарування TiO_2 , викликаного об'ємним розширенням під час окиснення. Водночас, наявність TiO_2 забезпечує тривалий захист через зменшення випаровування V_2O_3 [5]. Останнє дослідження свідчить про ефективність комбінованих багатокомпонентних покриттів на алмазних зернах.

Метою даної роботи було дослідження формування покриттів з двох та трьох компонентів на алмазних зернах, подальшого застосування їх у алмазному шліфувальному інструменті та визначення найбільш ефективних комбінованих покриттів для підвищення зносостійкості шліфувальних кругів та покращення шорсткості обробленої поверхні такими кругами.

Для досягнення цього було розроблено технологічний процес для формування покриттів з двох та трьох компонентів [6]:

- з розчинного оксиду B_2O_3 та нерозчинного оксиду Al_2O_3 (або іншого нерозчинного оксиду);
- з розчинного оксиду B_2O_3 та нерозчинного карбїду B_4C або SiC або TiC ;
- з розчинного оксиду B_2O_3 та суміші нерозчинного оксиду Al_2O_3 (або іншого нерозчинного оксиду) та нерозчинного карбїду B_4C або SiC , або TiC .

Послідовність формування покриттів була наступною. Спочатку було підготовлено насичений водний розчин розчинного оксиду B_2O_3 . Для утворення суспензії до 10–15 мл цього розчину додавали 0,3–0,5 г нерозчинного оксиду або карбїду. Алмазний порошок (25–30 карат), на який має бути нанесено покриття, змішували в фарфоровій чашці з 10–15 мл насиченої суспензії борного ангїдриду та нерозчинного оксиду або карбїду із застосуванням магнітної мішалки протягом 10 хв за нормальних умов. Надлишок розчину зливали, залишену суміш фільтрували. Осад на фільтрі приєднували до основної маси модифікованого порошку. Отриману вологу масу порошку висушували, розмішували до сухого однорідного стану і у фарфоровій чашці поміщали до піщаної бані з терморегулятором (за температури 120 °C).

Методом сканувальної електронної мікроскопії з додатковим використанням SE-детектора вторинних електронів Еверхарта-Торнлі та високочутливого 4-квадрантного фазового CZ BSD-детектора за різного збільшення досліджено шліфпорошки синтетичного алмазу АС6 125/100 з різними покриттями: $B_2O_3 + Al_2O_3$, $B_2O_3 + SiO_2$, $B_2O_3 + TiO_2$ (див. рис. 1), $B_2O_3 + ZnO$, $B_2O_3 + TiO_2$, $B_2O_3 + CeO_2$, $B_2O_3 + B_4C$, $B_2O_3 + SiC$; $B_2O_3 + B_4C + CeO_2$, $B_2O_3 + B_4C + Na_2O(SiO_3)$, $B_2O_3 + TiC + Na_2O(SiO_3)$. Результати проведених дослідів також показали значне (в середньому на 40 %) підвищення термостійкості алмазних шліфпорошків після нанесення таких покриттів із суміші розчинних та нерозчинних оксидів.

Надалі досліджували експлуатаційні характеристики алмазних кругів 12А2–45° 125×5×3×32 зі шліфпорошками синтетичного алмазу марки АС6 125/100 з багатокомпонентними термостабільними зносостійкими покриттями на основі оксиду бору B_2O_3 , як і в поєднанні з оксидами TiO_2 та CeO_2 , так і карбїдом B_4C . Для обробки було вибрано зразок з важкооброблюваного вольфрамо-титано-кобальтового твердого сплаву марки Т15К6 розмірами 63×15×7 мм. Дослідження процесу шліфування твердого сплаву алмазними кругами здійснювали на стенді, створеному на базі модернізованого універсально-заточувального верстату мод. 3В642. Режими шліфування: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,29 м/хв (для продуктивності обробки 100 мм³/хв), 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, щоби не вносити додаткових збурень в процес обробки, оскільки невідомою на даний момент є можливість ймовірної взаємодії оксидів зі складниками технологічної рідини. Оцінювали зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат алмазів q та шорсткість обробленої поверхні за показниками Ra і $t50$. Шорсткість оброблюваних поверхонь вимірювали за допомогою профілометра-профілографа мод. SurfTest SJ-201 фірми “Mitutoyo”, Японія. Результати випробувань наведено в табл. 1.

Порівняння показників кругів з покриттям поверхні алмазних зерен з показниками круга з не покритими зернами шліфпорошку АС6 125/100 (див. табл. 1) встановило, що багатокомпонентне покриття поверхні алмазних зерен сполу-

ченням оксидів B_2O_3 та CeO_2 фактично не покращує зносостійкість алмазного круга за будь-якої продуктивності шліфування. Тобто, таке сполучення для покриття поверхні алмазних зерен не є ефективним. А суміш двох оксидів ($B_2O_3 + TiO_2$) та суміш оксиду та карбіду ($B_2O_3 + B_4C$) дозволяють підвищити зносостійкість алмазного круга. Вказані покриття можна розташувати в ряд за збільшенням зносостійкості:

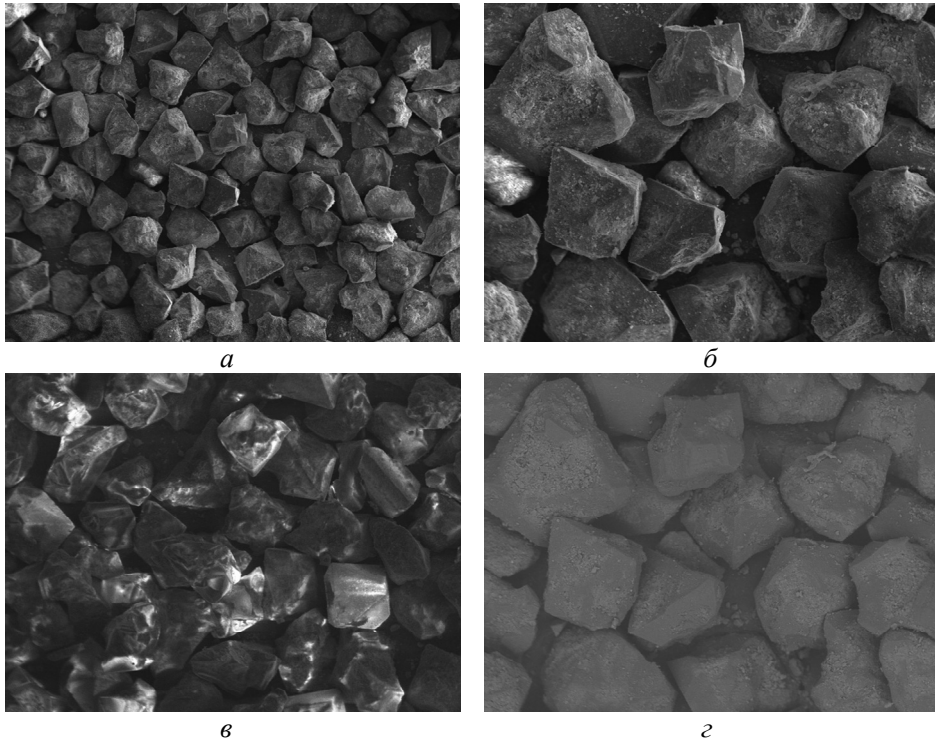
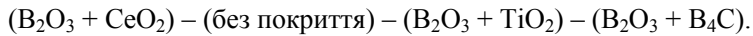


Рис. 1. Знімки зерен шліфпорошку AC6 125/100 з покриттям $B_2O_3 + TiO_2$: $\times 200$ (а), $\times 500$ (б), $\times 300$ (в) (SE-детектор), $\times 500$ (з) (BSD-детектор).

Таблиця 1. Експлуатаційні показники алмазних шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен 100 % із різними варіантами покриття поверхні алмазних зерен марки AC6 125/100

Покриття поверхні алмазних зерен у робочому шарі алмазних кругів 12A2-45° 125×5×3×32	Продуктивність обробки, мм ³ /хв					
	100		200		400	
	q, мг/г	Ra, мкм	q, мг/г	Ra, мкм	q, мг/г	Ra, мкм
$B_2O_3 + B_4C$	7	0,39	12	0,35	21	0,37
$B_2O_3 + TiO_2$	9	0,36	21	0,30	24	0,37
$B_2O_3 + CeO_2$	11	0,39	15	0,42	39	0,41
Без покриття	10	0,37	16	0,40	37	0,48

Різниця в зносостійкості алмазного круга для другої (без покриття) і останньої ($B_2O_3 + B_4C$) ланки вказаного ряду складає 1,42 для продуктивності

шліфування 100 мм³/хв. Тобто, зносостійкість алмазного круга у разі покриття поверхні зерен сумішшю В₂О₃ + В₄С підвищується у 1,42 рази.

У разі збільшення продуктивності в 4 рази розташування покриттів за збільшенням зносостійкості фактично не змінюється. Але для більш високої (400 мм³/хв) продуктивності обробки різниця в зносостійкості для другої (без покриття) і останньої (В₂О₃ + В₄С) ланки вказаного ряду складає 1,76, а це означає, що зносостійкість алмазного круга у разі покриття поверхні зерен сумішшю В₂О₃ + В₄С підвищується у 1,76 рази.

Тобто, покриття поверхні алмазних зерен сумішшю В₂О₃ + В₄С майже у 1,5 рази збільшує зносостійкість алмазних кругів як за невеликої, так і за підвищеної продуктивності обробки.

Аналіз зміни шорсткості оброблюваної поверхні показав, що, аналогічно до висновку [7], значний вплив має продуктивність шліфування. Якщо у разі невеликої (100 мм³/хв) продуктивності шліфувального круга з алмазними зернами без покриття поверхні оброблена поверхня за параметром *Ra* має майже таку шорсткість, як і кругом з алмазними зернами з багатокомпонентними покриттями (табл. 2), то під час зростання продуктивності до 200 мм³/хв той самий круг дає вже більші значення шорсткості за параметром *Ra*, ніж круги з покриттями алмазних зерен (табл. 3). Теж саме спостерігали і у разі збільшення продуктивності шліфування до 400 мм³/хв (табл. 4). Але у такому разі круги без покриття і з багатокомпонентними покриттями поверхні алмазних зерен розташовуються в наступному ряду за зменшенням параметра *Ra* обробленої поверхні:

(без покриття) – (В₂О₃+СeО₂) – (В₂О₃+В₄С) – (В₂О₃+ТiО₂).

Також було досліджено наповненість шорсткої поверхні за таким параметром опорної кривої, як *t50*. Чим більшими є значення *t50*, тим оброблювана поверхня має кращу тримальну здатність [8]. Аналіз даних табл. 2–4 свідчить, що цей показник для різних варіантів покриттів різниться мало, хоча у разі покриття поверхні зерен шліфпорошків алмазів АС6 125/100 сумішшю В₂О₃ + В₄С опорна крива обробленої поверхні має кращі показники, ніж у разі використання кругів з алмазами без покриття поверхні зерен. Більш детально особливості опорних кривих шорсткої поверхні показано на рис. 2, це підтверджує висновок у [8], що у разі необхідності зміною покриття поверхні алмазних зерен можна вплинути на тримальну здатність поверхні, отриманої під час шліфування.

Таблиця 2. Показники шорсткості обробленої поверхні твердого сплаву Т15К6 алмазними шліфувальними кругами на полімерній зв'язці В2-08 з відносною концентрацією зерен 100 % із різними варіантами покриття поверхні алмазних зерен марки АС6 125/100 (за продуктивності обробки 100 мм³/хв)

Покриття поверхні алмазних зерен у робочому шарі алмазних кругів 12А2-45° 125×5×3×32	Показники шорсткості			
	<i>Ra</i> , мкм	<i>Rmax</i> , мкм	<i>Sm</i> , мкм	<i>t50</i> , %
Без покриття	0,37	2,70	35	53,78
В ₂ О ₃ + В ₄ С	0,39	3,06	50	69,98
В ₂ О ₃ + ТiО ₂	0,36	3,71	27	79,90
В ₂ О ₃ + СeО ₂	0,39	2,96	43	46,52

Таблиця 3. Показники шорсткості обробленої поверхні твердого сплаву Т15К6 алмазними шліфувальними кругами на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100 % із різними варіантами покриттів поверхні алмазних зерен марки АС6 125/100 (за продуктивності обробки 200 мм³/хв)

Покриття поверхні алмазних зерен у робочому шарі алмазних кругів 12А2-45° 125×5×3×32	Показники шорсткості			
	Ra, мкм	Rmax, мкм	Sm, мкм	t50, %
Без покриття	0,40	2,60	69	65,25
В ₂ О ₃ + В ₄ С	0,35	2,85	98	55,22
В ₂ О ₃ + TiO ₂	0,30	1,97	73	64,77
В ₂ О ₃ +CeO ₂	0,42	3,30	110	84,27

Таблиця 4. Показники шорсткості обробленої поверхні твердого сплаву Т15К6 алмазними шліфувальними кругами на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100 % із різними варіантами покриттів поверхні алмазних зерен марки АС6 125/100 (за продуктивності обробки 400 мм³/хв)

Покриття поверхні алмазних зерен у робочому шарі алмазних кругів 12А2-45° 125×5×3×32	Показники шорсткості			
	Ra, мкм	Rmax, мкм	Sm, мкм	t50, %
Без покриття	0,48	2,73	146	63,99
В ₂ О ₃ + В ₄ С	0,37	2,99	50	71,73
В ₂ О ₃ + TiO ₂	0,37	2,68	59	51,67
В ₂ О ₃ + CeO ₂	0,41	2,74	66	65,31

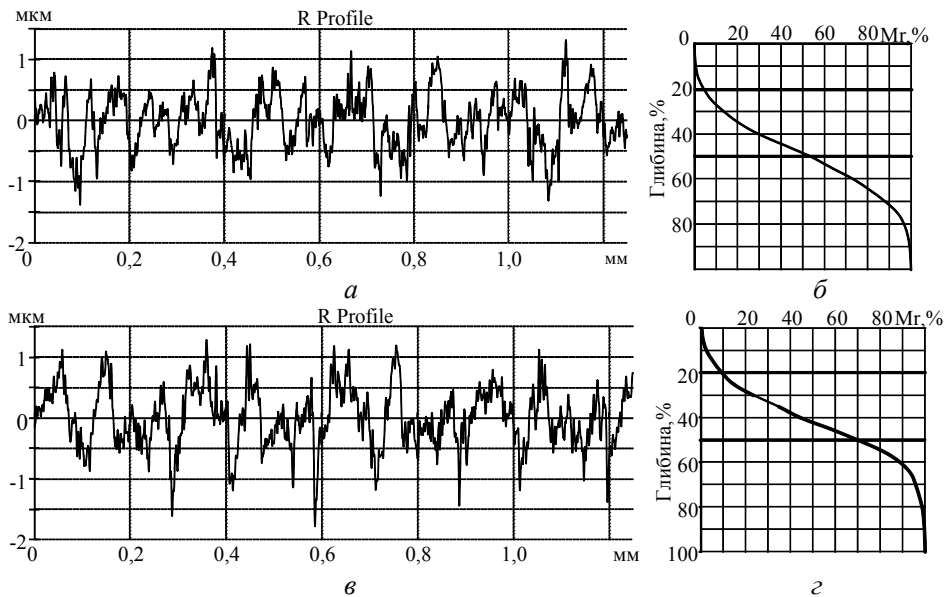


Рис. 2. Профілограми (а, б) і опорні криві профілю (б, з) поверхні, обробленої кругом без покриття поверхні зерен АС6 125/100 (а, б) і кругом з покриттям поверхні зерен сумішшю В₂О₃ + В₄С (б, з) у разі шліфування твердого сплаву з продуктивністю 100 мм³/хв.

ВИСНОВКИ

Для підвищення експлуатаційних характеристик шліфувального інструменту необхідно застосовувати алмазні шліфпорошки із захисними покриттями поверхні алмазних зерен.

Покриття поверхні алмазних зерен сумішшю $B_2O_3 + B_4C$ збільшує зносостійкість алмазних кругів як за невеликої (γ 1,4 рази), так і за підвищеної (1,8 рази) продуктивності обробки. Більш позитивним є вплив покриття поверхні алмазних зерен сумішшю $B_2O_3 + B_4C$ за підвищених силових і теплових навантажень в зоні шліфування.

Для досягнення меншої шорсткості обробленої поверхні найкращими покриттями є $B_2O_3 + B_4C$ та $B_2O_3 + TiO_2$ у разі збільшення продуктивності шліфування до $400 \text{ мм}^3/\text{хв}$.

У разі покриття поверхні зерен шліфпорошків алмазів AC6 125/100 сумішшю $B_2O_3 + B_4C$ наповненість нерівностей обробленої поверхні за параметром опорної кривої $r50$ має кращі показники і, відповідно, оброблена поверхня має кращу тримальну здатність.

Отже, як для збільшення зносостійкості алмазних кругів, так і показників шорсткості обробленої поверхні необхідно застосовувати під час шліфування твердих сплавів шліфувальний інструмент з алмазними зернами з покриттям їхньої поверхні сумішшю $B_2O_3 + B_4C$.

У разі особливих вимог до обробленої поверхні та інструменту можна застосовувати інші покриття поверхні алмазних зерен.

V. I. Lavrinenko¹, V. G. Poltoratskyi¹, O. O. Pasichnyi¹,
V. Yu. Solod²

¹Bakul Institute of Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Dniprovsky State Technical University,
Dnipro, Ukraine

Application of diamond grinding powder with combined
coatings on the surface of diamond grains in a grinding tool

A technological process has been developed for the formation of coatings on the surface of diamond grains from two and three components: from soluble oxide B_2O_3 and insoluble oxide Al_2O_3 or insoluble carbide (B_4C , SiC , TiC). It was established that in order to achieve a guaranteed increase in the wear resistance of diamond wheels in the case of grinding hard alloys, it is necessary to apply a coating of oxide and boron carbide ($B_2O_3 + B_4C$) to the surface of the diamond grains. The positive effect of such a surface coating of diamond grains is more pronounced under increased power and heat loads in the grinding zone. The holding capacity of the processed rough surface according to the parameter of the curve of the support surface $r50$ is better in the case of covering the surface of the grains of diamond grinding powders AS6 125/100 with a mixture of $B_2O_3 + B_4C$. That is, for diamond grains, taking into account both the wear resistance of diamond wheels and the parameters of the rough surface, it is recommended to use diamond grains with a $B_2O_3 + B_4C$ mixture in the wheels during grinding of hard alloys.

Keywords: combined protective coatings, diamond grinding powders, surface of diamond grains, wear resistance of diamond wheels, roughness of the treated surface.

1. 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. *Diamond Relat. Mater.* 2016. Vol. 69. P. 108–113.

2. Wu K., Zhang Y., Ma J., Fu Zh., Chen Ch. Two-dimensional hole gas formed at diamond surface by Al_2O_3 /diamond interface engineering. *Diam. Relat. Mater.* 2020. Vol. 105, art. 107807.
3. Deng A., Lu J., Li D., Wang Y. Exploring the activation energy of diamond reacting with metals and metal oxides by first-principle calculation. *Diam. Relat. Mater.* 2021. Vol. 118, art. 108522.
4. Lu J., Xu Y., Zhang Y., Xu X. The effects of SiO_2 coating on diamond abrasives in sol-gel tool for SiC substrate polishing. *Diam. Relat. Mater.* 2017. Vol. 76. P. 123–131.
5. 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.
6. Формування комбінованих багатокомпонентних термостабільних зносостійких покриттів з суміші розчинних та нерозчинних речовин: оксидів, силікатів та карбідів на поверхні зерен шліфпорошків абразивного призначення. Технологічна інструкція ТІ 25000.00855. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2022. 10 с.
7. Lavrinenko V.I., Pasichnyi O.O., Poltoratskyi V.G., Solod V.Yu., Muzychka D.G. Some specific features in shaping the cutting surface of a grinding wheel in circular direction under grinding with the use of wheels with a mixture of SHM grinding powders and a modified surface of their grains. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 1. P. 46–56.
8. Lavrinenko V.I. Degree of filling of the roughness profile of the surface obtained by diamond abrasive treatment as a factor affecting its bearing capacity. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 3. P. 217–225.

Надійшла до редакції 07.11.23

Після доопрацювання 28.12.23

Прийнята до опублікування 04.01.24