

# Інструмент, порошки, пасти

---

УДК 621.921.34-492.2:621.793.6:544.023.5:539.215

**Г. А. Петасюк\*, В. І. Лавріненко\*\*, В. Г. Полторацький,  
О. О. Пасічний, О. У. Петасюк**

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

\*petasyuk@ukr.net

\*\*lavrinen52@gmail.com

## **Дослідження взаємозв'язку технологічних властивостей модифікованих комбінованим покриттям шліфпорошків кубоніту з експлуатаційними характеристиками виготовлених з використанням таких порошків шліфувальних кругів**

*Проведено кількісний аналіз кореляційного взаємозв'язку технологічних властивостей модифікованих комбінованим покриттям шліфпорошків кубоніту з експлуатаційними характеристиками шліфувальних кругів, виготовлених з використанням таких порошків. Отримано значення парних коефіцієнтів кореляції між відносною втратою абразиву і шорсткістю обробленої поверхні за параметром  $R_a$  (залежні фактори), технологічними параметрами покриття, продуктивністю обробки та деякими морфометричними характеристиками і технологічними властивостями модифікованих шліфпорошків (незалежні фактори). Встановлено, що найбільший вплив на відносну витрату кубонітового шліфпорошку в кругах в процесі шліфування спричиняють продуктивність обробки (коефіцієнт кореляції – 0,884) та такі морфометричні характеристики, як шорсткість проекції зерен (коефіцієнт кореляції – 0,28) і зовнішня питома поверхня порошку (коефіцієнт кореляції – 0,294). У разі шорсткості обробленої поверхні за параметром  $R_a$  найбільше впливають на неї також продуктивність обробки з коефіцієнтом кореляції 0,856 та питомий периметр проекції зерна з коефіцієнтом кореляції 0,12. Представлено пропозиції щодо використання отриманих результатів.*

**Ключові слова:** кореляційний зв'язок, технологічні властивості, зерно, шліфпорошок, кубоніт, комбіноване покриття, шліфувальні круги.

### **ВСТУП**

Підвищення ефективності шліфувальних кругів із надтвердих матеріалів (НТМ) є актуальною задачею алмазно-абразивної обробки. Один із

© Г. А. ПЕТАСЮК, В. І. ЛАВРІНЕНКО, В. Г. ПОЛТОРАЦЬКИЙ, О. О. ПАСІЧНИЙ, О. У. ПЕТАСЮК, 2024

сучасних підходів до вирішення цієї задачі полягає у використанні в різальному шарі такого інструменту модифікованих шліфпорошків синтетичного алмазу та кубічного нітриду бору з нанесеними на їхні зерна термостійкими неорганічними покриттями. Водночас як спосіб покриття застосовують ізотермічне рідино-фазове нанесення з насичених розчинів термостійких оксидів ( $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ) і хлоридів ( $CaCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $MgCl_2$ ,  $BaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $FeCl_3$ ) металів і неметалів та їхніх сумішей ( $B_2O_3 + CaCl_2$ ,  $B_2O_3 + NaCl$ ) [1–3]. Як складові покриття використовують також кисневмісні ( $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $TiO$ ,  $CaO$ ,  $ZnO$ ,  $CeO_2$ ,  $SnO_2$ ), силікатовмісні ( $Na_2O(SiO_2)_n$ ),  $K_2O(SiO_2)_n$ ) та карбідомісні ( $SiC$ ,  $TiC$ ,  $V_4C$ ) сполуки у різних поєднаннях [4].

Серед інших відомих підходів до вирішення зазначеної вище задачі можна відмітити нанесення на зерна абразивних порошків НТМ металевих чи композиційних електрохімічних покриттів (КЕП) [5]. В якості матеріалу покриття, як показав проведений авторами огляд публікацій, використовують метали, переважно нікель, кобальт, олово, алюміній та їхні сплави. Традиційно процес нанесення такого покриття називався металізацією, а отримані в такий спосіб модифіковані порошки – металізованими. Активний розвиток металізації шліфпорошків синтетичного алмазу та кубічного нітриду бору, вивчення властивостей отриманих металізованих порошків, їхнє застосування у різальному шарі шліфувальних кругів було започатковано у 70–80-их роках минулого століття. Саме на цей період припадає найбільша кількість публікацій за цією тематикою, хоча і в наш час є приклади подібних за тематичною спрямованістю, тобто присвячених металізації, публікацій [6, 7].

Так, в [8] вивчали особливості електроосадження і властивості КЕП на основі кобальт-нікелевого сплаву та впливу ступеня металізації як основного технологічного параметру покриття на характеристики процесу шліфування. Відзначали, що на відносну витрату абразиву істотний вплив має ступінь металізації його зерен. Окрім оптимального значення цього параметру великий вплив має також однорідність структури КЕП та рівномірний розподіл частинок дисперсної фази в матриці. Констатували, що застосування алмазних шліфпорошків з КЕП дозволяє підвищити термін експлуатаційної придатності інструменту в 2,0–2,5 рази. У [9] зазначено, що використання в різальному шарі шліфувальних кругів металізованих мідно-олов'яним сплавом шліфпорошків кубічного нітриду бору у 3–4 рази підвищує зносостійкість такого інструменту.

В [10] розглянуто спосіб отримання спеціальних КЕП на основі кобальт-нікелевого сплаву з включенням різноманітних карбідів для металізації алмазних порошків, які використовують в шліфувальних кругах. Зазначено, що товщина покриттів складала 17–20 мкм. Пояснено механізм (ефект) підвищення зносостійкості інструментів на органічних зв'язках у разі використання металізованих алмазних шліфпорошків. Як фактори процесу шліфування розглянуті відносна витрата абразиву, шорсткість обробленої поверхні та ефективна потужність шліфування. Проведені авторами дослідження підтверджують, що нанесення на зерна алмазних шліфпорошків спеціальних КЕП на основі кобальт-нікелевого сплаву з включенням різноманітних карбідів підвищує зносостійкість виготовлених з їх використанням шліфувальних кругів. Встановлено, що водночас важливе значення має оптимальний ступінь покриття зерен. На важливість цього фактору покриття вказано також в [11].

У [12] вивчали зносостійкість шліфувальних кругів в залежності від режимів обробки. Товщину покриття визначали за методикою [13]. Автори відзначали, що з підвищенням ступеня металізації товщина покриття збіль-

шується за лінійною залежністю. Про такий же характер взаємозв'язку між цими двома параметрами металізованих порошків заявляли і в [14, 15].

У зазначених вище і інших подібних їм за тематичною спрямованістю публікаціях увага акцентована головне на взаємозв'язку відносної витрати абразиву і шорсткості обробленої поверхні як характеристик процесу шліфування з продуктивністю і технологічними режимами процесу шліфування кругами, в різальному шарі яких використані шліфпорошки з нанесеними на їхні зерна КЕП. Основну увагу було приділено ступеню металізації покриття та його товщині. Зазначено, що максимальний позитивний ефект від нанесення покриття досягали лише за оптимальних значень цих двох технологічних параметрів покриття [8, 11, 12, 14]. Було вивчено вплив окремих технологічних характеристик процесу шліфування і товщини покриття зерен на відносну витрату абразиву та на шорсткість обробленої поверхні [12]. Щодо товщини покриття зерен, то варто прокоментувати беззастережне твердження авторів [12] стосовно лінійної залежності товщини  $h$  покриття від ступеню металізації  $\mu$ .

Причиною такого висновку авторів [12], а також у [14, 15], є та обставина, що товщину покриття визначали опосередковано-аналітичним методом за формулою, отриманою в [13], яка потім була застосована і в [14, 16]. Щодо цієї формули, то вона, як відзначали в [17], не є досконалою в методичному сенсі. Так, права її частина не містить в явному виді ступінь покриття, а з аналізу структури цієї формули слідує, що цей параметр покриття є лінійним. А оскільки автори [12, 14, 15] у процесі опосередковано-аналітичного визначення товщини покриву користувалися саме цією формулою, то звідси і такий некоректний висновок стосовно беззастережно лінійної залежності товщини покриття від ступеня металізації. Формула, про яку йде мова, базується на 3D-моделі зерна у формі куба, який, як і куля, є однопараметричним просторовим тілом. Теоретично обґрунтована загальна достовірна формула опосередковано-аналітичного визначення товщини для зазначених 3D-моделей його зерна отримана в [17] і має наступний вигляд:

$$h = \frac{d}{2} \left( \sqrt[3]{1 + \mu \frac{\rho_a}{\rho_m}} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $\rho_a$  – густина матеріалу абразиву;  $\rho_m$  – густина матеріалу металу покриття;  $\mu = m_m/m_a$  – ступінь металізації;  $m_m$  – маса, витраченого на покриття маси  $m_a$  шліфпорошку. За діаметр кулі чи довжину ребра куба приймали середній розмір  $d$  зерна абразиву до покриття. Як видно з правої частини теоретично обґрунтованої достовірної формули (1), взаємозв'язок між товщиною і ступенем покриття не є лінійним.

Викладений вище підхід для визначення товщини покриття в поєднанні з 3D-моделлю зерна у формі кулі використовували, наприклад, в [18, 19]. Для порошків, 3D-форма зерен яких є куля чи куб, формула (1) дає абсолютно точне значення товщини покриття. Зазначимо також, що формула (1) дійсна і для 3D-моделей зерна у формі октаедра, кубооктаедра та усіченого октаедра, які характерні для висококомічних шліфпорошків СА.

Щодо лінійної залежності товщини покриття від ступеню металізації, про яку згадано в [12, 14, 15], то вона набуває такого характеру лише у тому разі, коли виконується умова  $h \ll d$ , де  $d$  – характерний розмірний параметр зерна, тобто, коли товщина покриву набагато менша характерного розмірного параметру зерен, що властиво для тонкошарових покриттів. У такому разі в про-

цесі виведення залежності (1) для розрахунку товщини покриття зерна з використанням 3D-моделі його зерна у формі куба, як це мало місце у [13, 15], можна знехтувати членами  $(h/d)^2$  і  $(h/d)^3$  (як це було зроблено у [13]), і тоді дійсно отримуємо наближену лінійну залежність для розрахунку  $h$ , але вона не буде точною. Більш детальний аналіз цього факту та відповідне аналітичне його обґрунтування було виконано в [17].

Огляд наявних публікацій також показав, що у відомих дослідженнях охоплені лише дві групи факторів – технологічні режими шліфування та технологічні параметри покриття, представлені ступенем покриття та його товщиною. В подальшому для стислості викладу будемо називати їх факторами впливу. За таких умов об'єктом впливу будуть відносна витрата абразиву і шорсткість обробленої поверхні як характеристики процесу шліфування. Повертаючись до висновків за проведеним літературним оглядом, зауважимо, що в останніх новітніх публікаціях за цим напрямком досліджень все більшу увагу дослідників привертають і морфометричні характеристики та технологічні властивості шліфпорошків синтетичного алмазу та кубічного нітриду бору з нанесеними на поверхню їхніх зерен покриттями [1, 6, 7]. Однак дослідження зазначених атрибутів модифікованих шліфпорошків обмежується лишень констатацією факту їхнього впливу на характеристики процесу шліфування. Проте позитивним фактом є те, що особливу увагу звертають на важливість тих морфометричних характеристик, які відображають розвиненість поверхні зерен модифікованих шліфпорошків (шорсткість проекції зерна, питомий периметр проекції зерен, зовнішня питома поверхня), впливають на число зерен в одному караті, кількість і середнє значення кутів загострення різальних кромки, однорідність шліфпорошків за формоподібністю проекції зерен, товщину нанесеного покриття. Ці морфометричні характеристики та технологічні властивості впливають і на міцність утримання зерен у різальному шарі круга, а відтак і на питому витрату абразиву, його абразивну здатність.

Погоджуючись із цим відомим фактом, зазначимо, що зовсім вже поза увагою дослідників залишилося вивчення на кількісному рівні взаємозв'язку відносної витрати абразиву і шорсткості обробленої поверхні із морфометричними характеристиками та технологічними властивостями і можливі корисні висновки із такого вивчення. Найкращим підходом до вирішення такої задачі була б побудова теоретичних моделей такого взаємозв'язку на рівні фізичних процесів, якими супроводжується процес шліфування. Проте це вкрай складна задача, яка чекає на своє вирішення. Альтернативний підхід – це емпіричне вивчення із застосуванням методичного апарату математичної статистики, зокрема кореляційного та регресійного аналізу. Із врахуванням цього, метою даної роботи була кількісна оцінка кореляційного взаємозв'язку технологічних властивостей модифікованих комбінованим покриттям шліфпорошків кубоніту KB 125/100 з експлуатаційними характеристиками виготовлених з використанням таких порошків шліфувальних кругів.

## **МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА АНАЛІТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Відносно новим способом модифікування шліфпорошків НТМ, як зазначено вище, є покриття їхніх зерен комбінованими багатокомпонентними зносостійкими покриттями на основі оксидів, хлоридів металів і неметалів та їхніх сумішей, кисне-, силікато- та карбідовмісних сполук у різних поєднаннях [1, 4]. Як спосіб покриття застосовували рідинно-фазове нанесення з насиченого розчину зазначених сполук.

Предметом дослідження цієї роботи є кількісний аналіз кореляційного взаємозв'язку технологічних властивостей модифікованих комбінованим покриттям шліфпорошків кубоніту KB 125/100 з експлуатаційними характеристиками виготовлених з використанням таких порошків шліфувальних кругів.

Модифікування здійснювали нанесенням на зерна шліфпорошку кубічного нітриду бору рідинно-фазовим способом багатокомпонентних покриттів на основі як двох оксидів, так і суміші оксиду з карбідом. Отримані модифіковані шліфпорошки діагностували за допомогою приладу DiaInspect.OSM [20] для визначення їхніх морфометричних характеристик. Із всього переліку зазначених характеристик в цій роботі було використано лише ті, які використовували як початкові дані для опосередковано-аналітичного визначення технологічних властивостей досліджуваних шліфпорошків та об'єму зерен. Такими морфометричними характеристиками слугували максимальний ( $F_{\max}$ ) та мінімальний ( $F_{\min}$ ) діаметри Фере, Фере подовження ( $F_{el}$ ), форм-фактор, шорсткість і периметр проекції зерна, площа проекції зерна загальна і відносна доля прозорої частини проекції в загальній її площі (Arealight,  $A_{lg}$ ). Поняттєвий сенс цих морфометричних характеристик та геометрична їхня інтерпретація представлено на сайті фірми VOLLSTÄDT DIAMANT GmbH [20] та в публікаціях його розробників, наприклад, в [21].

За цими характеристиками, як початковими даними, опосередковано-аналітичними методами [22–25] визначали наступні технологічні властивості: питомий периметр  $P_{\text{пт}}$  проекції зерен, число  $N$  зерен в одному караті, зовнішня питома поверхня  $F_{\text{пт}}$ , кількість  $n_z$  і середнє значення кутів  $\phi$  загострення різальних кромок, однорідність  $u_{\text{ф.про}}$  шліфпорошків за формоподібністю проекції зерен. Водночас число зерен в одному караті і кількість кутів загострення різальних кромок були об'єднані в один незалежний фактор шляхом утворення їхнього добутку, тобто  $n_z \times N$ . Значення перелічених вище характеристик і технологічних властивостей представлені в табл. 1.

**Таблиця 1. Значення морфометричних характеристик і технологічних властивостей модифікованих шліфпорошків кубічного нітриду бору KB 125/100 з нанесеними на їхні зерна комбінованими багатокомпонентними зносостійкими покриттями на основі оксидів і карбідів**

Складові матеріалу покриття	$R_g$	$P_{\text{пт}}, \text{мкм}^{-1}$	$F_{\text{пт}}, \text{м}^2/\text{кг}$	$u_{\text{ф.про}}$	$h, \text{мкм}$	$n_z \times N, \text{шт.}$	$\phi, \text{град}$	Ступінь покриття $\mu, \%$
$\text{V}_2\text{O}_3 + \text{V}_4\text{C}$	1,074	0,0283	19,94	57,56	1,000	501902	100,97	4,26
$\text{V}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	1,070	0,0299	17,56	56,47	4,940	445974	100,48	10,20
$\text{V}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$	1,080	0,0311	18,60	67,13	2,950	460430	99,57	18,68
$\text{V}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$	1,076	0,0319	17,91	61,48	3,203	471101	99,24	8,6
Без покриття*	1,0676	0,0322	17,40	62,26	–	463032	101,04	–

\*Початковий шліфпорошок KB 125/100.

Додатково виконували також діагностування морфометричних характеристик та об'єму зерен початкових шліфпорошків. За отриманими даними та за густиною матеріалу покриття і абразиву методами, викладеними в [26, 27], було проведено визначення ступеню  $\mu$  покриття та його товщини  $h$  відповідно. Отримані значення цих параметрів покриття також подаються у табл. 1.

Отримані модифіковані багатокомпонентними покриттями на основі оксидів і сумішей оксиду з карбідом кубонітові шліфпорошки були використані в різальному шарі виготовлених шліфувальних кругів. Складові матеріалу покриття представлені у табл. 1. Випробування шліфувальних кругів проводили під час обробки важкооброблюваної швидкорізальної сталі марки Р6М5 з розмірами зразка 100×20×8 мм. Режими шліфування: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,25 м/хв (для продуктивності обробки 50 мм<sup>3</sup>/хв), 0,5 м/хв (для 100 мм<sup>3</sup>/хв) та 1 м/хв (для 200 мм<sup>3</sup>/хв). Шліфування проводили без охолодження. Оцінювали зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносної витрати  $q$  абразиву та за шорсткість обробленої поверхні за показником  $Ra$ . Результати випробувань наведено у перших двох колонках табл. 2, в решті колонок наведено значення морфометричних характеристик, технологічних властивостей та технологічних параметрів покриття для кожного значення продуктивності обробки  $Q$  (третя колонка).

**Таблиця 2. Матриця, сформована за результатами випробування шліфувальних кругів 12A2-45 125×5×3×32 25 ст, 100 % В2-08 (залежні фактори –  $q$  та  $Ra$ , незалежний фактор –  $Q$ ) та за морфометричними характеристиками і технологічними властивостями модифікованих шліфпорошків (незалежні фактори), використаних в різальному шарі дослідних кругів, для кореляційного аналізу взаємозв'язку залежних і незалежних факторів**

$q$ , мг/г	$Ra$ , мкм	$Q$ , мм <sup>3</sup> /хв	Морфометричні характеристики та технологічні властивості						
			$Rg$	$P_{пт}$ , мкм <sup>-1</sup>	$F_{пт}$ , м <sup>2</sup> /кг	$u_{ф.про}$	$h$ , мкм	$n_z \times N$ , шт.	$\varphi$ , град
0,73	0,25	50	1,103	0,0283	22,27	53,26	2,278	452574	91,91
0,69	0,29	50	1,074	0,0283	19,94	57,56	1,000	501902	100,97
1,12	0,32	50	1,070	0,0299	17,56	56,47	4,940	445974	100,48
0,53	0,29	50	1,080	0,0311	18,60	67,13	2,950	460430	99,57
1,07	0,30	50	1,076	0,0319	17,91	61,48	3,203	471101	99,24
1,27	0,57	100	1,103	0,0283	22,27	53,26	2,278	452574	91,91
1,23	0,50	100	1,074	0,0283	19,94	57,56	1,000	501902	100,97
1,53	0,50	100	1,070	0,0299	17,56	56,47	4,940	445974	100,48
1,10	0,53	100	1,080	0,0311	18,60	67,13	2,950	460430	99,57
1,36	0,49	100	1,076	0,0319	17,91	61,48	3,203	471101	99,24
1,48	0,63	200	1,103	0,0283	22,27	53,26	2,278	452574	91,91
2,21	0,72	200	1,074	0,0283	19,94	57,56	1,000	501902	100,97
2,91	0,70	200	1,070	0,0299	17,56	56,47	4,940	445974	100,48
2,25	0,60	200	1,080	0,0311	18,60	67,13	2,950	460430	99,57
2,22	0,47	200	1,076	0,0319	17,91	61,48	3,203	471101	99,24

Зауважимо, що табл. 2 є своєрідним продовженням табл. 1. Наведена в табл. 2 інформація стосується характеристик різального шару круга, режимних параметрів процесу обробки (продуктивності обробки  $Q$ , мм<sup>3</sup>/хв) та зносостійкості за відносною витратою абразиву (кубічного нітриду бору) і шорсткості обробленої поверхні як показників процесу обробки. Із цього переліку залежними факторами були  $q$  та  $Ra$ , всі інші параметри – незалежними фак-

торами. Такий формат цієї таблиці був зручним для перетворення її у матриці, які слугували початковими даними для дослідження розглянутого кореляційного взаємозв'язку.

З використанням розроблених авторами оригінальних програмних засобів та числової інформації, поданої в цій таблиці-матриці як початкових даних, було проведено спрощений кореляційний аналіз взаємозв'язку незалежних факторів з кожним із залежних факторів. Спрощення стосувалося того, що обчислювали і аналізували лише коефіцієнти парної кореляції та коефіцієнт множинної кореляції. Цих двох статистичних параметрів достатньо для досягнення мети дослідження, яке проводили. Коефіцієнт множинної кореляції  $R_{y|x_1, x_2, \dots, x_n}$  – це деяке число від 0 до 1, що характеризує ступінь лінійного кореляційного зв'язку між незалежними  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  і залежною ( $y$ ) випадковими величинами [28]. Його значення обчислюється за формулою

$$R_{y|x_1, x_2, \dots, x_n} = \sqrt{1 - \frac{\Delta r}{\Delta r_{ic}}}, \quad (2)$$

де  $r$ ,  $r_{ic}$  – матриці парних коефіцієнтів кореляції та міжфакторної кореляції відповідно;  $\Delta r$ ,  $\Delta r_{ic}$  – визначники цих матриць. Ідентифікація незалежних величин або факторів  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  для нашого дослідження була такою:  $x_1 \sim Q$ ;  $x_2 \sim Rg$ ;  $x_3 \sim P_{пт}$ ;  $x_4 \sim F_{пт}$ ;  $x_5 \sim u_{ф.про}$ ;  $x_6 \sim h$ ;  $x_7 \sim n_z \times N$ ;  $x_8 \sim \phi$ . Залежними факторами (загальне позначення  $y$ ) в нашому дослідженні були відносна витрата  $q$ , мг/г абразивного шліфпорошку та шорсткість  $Ra$ , мкм обробленої поверхні.

Визначення парних коефіцієнтів кореляції та коефіцієнта множинної кореляції проводили з використанням розробленого авторами оригінального комп'ютерно-програмного забезпечення та інформації, представленої у табл. 2. Були отримані матриці для парних коефіцієнтів кореляції  $r$ , які фігурують у формулі (2), але які через громіздкість виразів тут не наведені. У разі матриць для обчислення визначників  $\Delta r_{ic}$ , які також фігурують у формулі (2), то їх отримують із згадуваних вище матриць  $r$  викреслюванням в них першої стрічки і першого рядка.

Використання створеного авторами оригінального комп'ютерно-програмного забезпечення пов'язано переважно із тим, що воно було вже розроблено. Необхідність у його розробці у свій час була обумовлена наступними обставинами. З електронного ресурсу відомі за подібним призначенням комп'ютерно-програмні засоби (наприклад пакет STATISTIKA [29]). Проте його використання носить одноразовий характер і є складним. Водночас в науково-прикладних дослідженнях досить часто трапляються ситуації, коли визначення парних коефіцієнтів кореляції та коефіцієнта множинної кореляції необхідно провести в одному циклі для певної сукупності окремих наборів експериментальних даних. Саме з такою метою і було створено авторами зазначене вище оригінальне комп'ютерно-програмне забезпечення. Подібна ситуація мала місце і у разі досліджень, що проводили автори цієї роботи. Тому нам було зручніше і доцільніше використати власне програмне забезпечення, у процесі створення якого було виконано і його тестування. Для тестування були використані приведені у [30] експериментальні дані та розраховані за ними коефіцієнти кореляції. За результатами тестування нашими програмними засобами були безпомилково відтворені значення коефіцієнтів кореляції, отриманих авторами [30].

## ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У процесі прийнятого авторами спрощеного кореляційного аналізу цікавили лише коефіцієнти парної кореляції залежної величини (в даному разі відносної витрати абразиву та шорсткості обробленої поверхні) із незалежними. Вони знаходяться у першому рядку (а в силу симетрії матриць коефіцієнтів кореляції також і в першій колонці) зазначеної матриці  $r$ . Для зручності подальшого викладу матеріалу вони наведені окремо для кожного із двох залежних факторів (табл. 3).

Щодо коефіцієнтів парної кореляції між незалежними факторами, які в математичній статистиці іменуються коефіцієнтами міжфакторної кореляції, то їхній аналіз не був метою нашого дослідження. Коефіцієнти множинної кореляції, як було зазначено, вираховували за залежністю (2) з використанням створеного авторами оригінального програмного забезпечення. Цьому передувало обчислення визначників кореляційних матриць  $r$  і  $r_{ic}$  для кожного із залежних факторів. Значення коефіцієнтів множинної кореляції виявилися такими:  $R_m = 0,884$  у разі відносної витрати абразиву та  $R_m = 0,856$  у разі шорсткості обробленої поверхні.

**Таблиця 3. Коефіцієнти кореляції незалежних факторів із зносостійкістю інструменту за відотною витратою  $q$ , мг/г абразиву та із шорсткістю  $Ra$ , мкм обробленої поверхні як залежними факторами**

Залежний фактор	Незалежні фактори							
	$Q$ , мм <sup>3</sup> /хв	$Rg$	$P_{пт}$ , мкм <sup>-1</sup>	$F_{пт}$ , м <sup>2</sup> /кг	$u_{ф.про}$	$n_z \times N$ , шт.	$\varphi$ , град	$h$ , мкм
$q$ , мг/г	0,884	-0,280	0,268	-0,294	-0,018	0,278	-0,085	0,225
$Ra$ , мкм	0,856	-0,010	-0,120	0,051	-0,090	-0,011	-0,003	0,014

Порівняльний аналіз наведених у табл. 3 парних коефіцієнтів кореляції показує, що найбільший вплив на відносну витрату кубонітового шліфпорошку виявляють продуктивність обробки, шорсткість проекції зерен, питомий периметр проекції зерна, зовнішня питома поверхня, добуток середнього значення кількості кутів загострення різальних кромки на число зерен в одному караті та товщина покриття. Значно меншими коефіцієнти кореляції були між відотною витратою кубонітового шліфпорошку та однорідністю модифікованого шліфпорошка за формоподібністю проекції зерен та середнім значенням кутів загострення різальних кромки. У разі шорсткості обробленої поверхні за параметром  $Ra$  найбільший вплив на неї мають також продуктивність обробки та питомий периметр проекції зерен. Значно меншим був коефіцієнт кореляції між шорсткістю обробленої поверхні за параметром  $Ra$  та однорідністю шліфпорошків за формоподібністю проекції зерен. Зовсім незначні коефіцієнти кореляції мають місце у випадку шорсткості проекції зерен, питомого периметру проекції зерна, зовнішньої питомої поверхні, товщини покриття, середнього значення кутів загострення різальних кромки та добутку середнього значення кількості кутів загострення різальних кромки на число зерен в одному караті.

Отримані значення коефіцієнтів множинної кореляції ( $R_m = 0,884$  у разі відносної витрати абразиву та  $R_m = 0,856$  у разі шорсткості обробленої поверхні) свідчать про наявність досить тісного взаємозв'язку [28] між відібраною для



аналізу сукупністю незалежних факторів і кожним із залежних факторів, особливо це стосується відносної витрати абразиву.

Для представлення цього взаємозв'язку в аналітичному вигляді було виконано апроксимацію відповідних експериментальних даних, відібраних із врахуванням виконаного вище аналізу коефіцієнтів кореляції, із використанням програмного комплексу LgArgox [31]. Для  $q$ , як одного із двох залежних факторів, в автоматизованому режимі було проаналізовано 12288 варіантів апроксимівних залежностей. Найбільш оптимальна за середнім значенням відносної похибки із них була такою:

$$d = \frac{1}{a_0 + \frac{a_1}{3 \lg Q} + a_2 (Rg)^3 + \frac{a_3}{(F_{\text{пр}})^3}}, \quad (3)$$

де  $a_0 = -1,581$  г/мг;  $a_1 = 16,30475$  г·мм<sup>3</sup>·мг<sup>-1</sup>·хв<sup>-1</sup>;  $a_2 = 0,07028$  г·мг<sup>-1</sup>;  $a_3 = -2783,561$  г·м<sup>6</sup>·мг<sup>-1</sup>·кг<sup>-3</sup>. Середнє значення відносної похибки відхилення розрахункових даних з відносної витрати дорівнювало 14,15 % із рівнозначною тенденцією як до завищення, так і до заниження результатів прогнозування (33,33 %), максимальне значення відносної похибки відхилення складало 48,11 %.

Для  $Ra$ , як другого залежного фактору, в автоматизованому режимі було проаналізовано 1492992 варіантів апроксимівних залежностей. Найбільш оптимальна за середнім значенням відносної похибки із них була такою:

$$Ra = \frac{1}{a_0 + \frac{a_1}{Q^2} + \frac{a_2}{Rg^2} + 3a_3 \lg(P_{\text{пр}}) + \frac{a_4}{3 \lg(F_{\text{пр}})} + \frac{a_5}{h^2} + a_6(\varphi)^2}, \quad (4)$$

де  $a_0 = 29,302$  мкм<sup>-1</sup>;  $a_1 = 4949,32$  мм<sup>6</sup>·мкм<sup>-1</sup>·хв<sup>-2</sup>;  $a_2 = 180,996$  мкм<sup>-1</sup>;  $a_3 = 12,781$ ;  $a_4 = -436,402393$  м<sup>2</sup>·кг<sup>-1</sup>·мкм<sup>-1</sup>;  $a_5 = -2,69039$  мкм<sup>-1</sup>;  $a_6 = -0,001066$  мкм<sup>-1</sup>·град<sup>-1</sup>. Середнє значення відносної похибки відхилення розрахункових даних з шорсткості обробленої поверхні дорівнювало 7,25 % із тенденцією до збігу прогнозованих результатів із фактичними даними за допустимого значення відхилення 10 %, максимальне відхилення було 20,72 %.

Результати відтворення відповідних експериментальних даних за залежностями (3) та (4) представлені у табл. 4 та 5 відповідно.

**Таблиця 4. Результати відтворення експериментальних даних за залежністю (3) для відносної витрати  $q$  кубоніту**

Q, мм <sup>3</sup> /хв	Rg	F <sub>пр</sub> , м <sup>2</sup> /кг	q, мг/г		
			експериментальне	прогнозоване	відносна похибка визначення, %
50	1,103	22,27	0,73	0,693	5,05
50	1,074	19,94	0,69	0,739	7,04
50	1,070	17,56	1,20	0,840	24,97
50	1,080	18,60	0,53	0,785	48,11
50	1,076	17,91	1,07	0,819	23,46
100	1,103	22,27	1,27	1,022	19,55
100	1,074	19,94	1,23	1,146	6,81
100	1,070	17,56	1,53	1,412	7,75

**Таблиця 4. (Продовження)**

100	1,080	18,60	1,10	1,262	14,72
100	1,076	17,91	1,36	1,352	9,06
200	1,103	22,27	1,48	1,651	11,55
200	1,074	19,94	2,21	1,935	12,47
200	1,070	17,56	2,91	2,833	2,64
200	1,080	18,60	2,25	2,2889	1,72
200	1,076	17,91	2,22	2,604	17,31

**Таблиця 5. Результати відтворення експериментальних даних за залежністю (4) для шорсткості  $Ra$  обробленої поверхні**

$Q$ , мм <sup>3</sup> /хв	$Rg$	$P_{пт}$ , мкм <sup>-1</sup>	$F_{пт}$ , м <sup>2</sup> /кг	$h$ , мкм	$\phi$ , град	$Ra$ , мкм		
						точне (експериментальне)	прогнозоване	відносна похибка визначення, %
50	1,103	0,0283	22,27	2,278	91,91	0,25	0,281	12,351
50	1,074	0,0283	19,94	1,000	100,97	0,29	0,295	1,640
50	1,070	0,0299	17,56	4,940	100,48	0,32	0,304	5,151
50	1,080	0,0311	18,60	2,950	99,57	0,29	0,290	0,024
50	1,076	0,0319	17,91	3,203	99,24	0,30	0,276	7,879
100	1,103	0,0283	22,27	2,278	91,91	0,57	0,482	15,470
100	1,074	0,0283	19,94	1,000	100,97	0,50	0,524	4,832
100	1,070	0,0299	17,56	4,940	100,48	0,50	0,552	10,504
100	1,080	0,0311	18,60	2,950	99,57	0,53	0,509	3,863
100	1,076	0,0319	17,91	3,203	99,24	0,49	0,469	4,349
200	1,103	0,0283	22,27	2,278	91,91	0,63	0,587	6,862
200	1,074	0,0283	19,94	1,000	100,97	0,72	0,651	9,613
200	1,070	0,0299	17,56	4,940	100,48	0,70	0,695	0,702
200	1,080	0,0311	18,60	2,950	99,57	0,60	0,628	4,730
200	1,076	0,0319	17,91	3,2030	99,24	0,47	0,567	20,725

Порівняльний аналіз показує, що залежність (4) дає кращі результати апроксимації, ніж залежність (3). Підвищення відтворювальної здатності залежності (3) можна досягти через використання більшої кількості експериментальних даних, які використовують для її побудови.

### ВИСНОВКИ

Порівняльний аналіз парних коефіцієнтів кореляції за рівнянням (3) свідчить, що найбільший вплив на відносну витрату кубонітового шліфпорошку в кругах під час шліфування спричиняють продуктивність обробки та такі морфометричні характеристики зерен, як шорсткість проекції зерен та зовнішня питома поверхня зерна. Тобто, саме на ці дві характеристики модифікованих зерен треба в першу чергу звертати увагу. Збільшення значення характеристики  $Rg$  та зменшення характеристики  $F_{пт}$  дозволить знизити відносні витрати кубоніту в кругах у разі шліфуванні за інших однакових умов.

У разі шорсткості обробленої поверхні за параметром  $Ra$  найбільший вплив за рівнянням (4) на неї мають продуктивність обробки та такі морфометричні характеристики зерен, як шорсткість проекції зерен, питомий периметр проекції зерна, зовнішня питома поверхня зерна, середнє значення кутів загострення різальних кромки та такий технологічний параметр, як товщина покриття. Водночас для зменшення показника шорсткості обробленої поверхні за параметром  $Ra$  треба в покритих шліфпорошках прагнути до зменшення морфометричних характеристик  $Rg$  і  $F_{\text{пр}}$  та підвищення характеристик  $P_{\text{пр}}$  і  $\phi$ , а також збільшення такого технологічного параметра покриття, як його товщина.

Найбільший вплив на підвищення ефективності процесу шліфування швидкорізальних сталей через зменшення відносної витрати кубоніту в кругах, а також на шорсткість обробленої поверхні має така технологічна властивість зерен кубоніту, як зовнішня питома поверхня зерна, її необхідно зменшувати.

Виконані дослідження дали можливість виявити морфометричні характеристики та технологічні властивості модифікованих абразивних порошків, використаних у різальному шарі шліфувальних кругів, які найбільш впливають на ефективність такого інструменту. Це дозволяє визначити напрямки вдосконалення технології нанесення покриття на зерна абразиву з метою забезпечення екстремальних значень саме цих характеристик модифікованих шліфпорошків кубічного нітриду бору.

Отримані залежності дозволяють прогнозувати можливі значення відносної витрати абразиву та шорсткості обробленої поверхні за параметрами процесу обробки та за показниками визначальних морфометричних характеристик модифікованих шліфпорошків, використаних у різальному шарі кругів.

G. A. Petasyuk, V. I. Lavrinenko, V. G. Poltoratskyi,

O. O. Pasichnyi, O. U. Petasyuk

Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Study of the relationship between the technological properties of cubonite grinding powders modified with a combined coating and the operational characteristics of grinding wheels made using such powders

*A quantitative analysis of the correlation relationship between the technological properties of cubonite grinding powders modified with a combined coating and the operational characteristics of grinding wheels made using such powders was carried out. The value of paired correlation coefficients between the relative loss of the abrasive and the roughness of the treated surface according to the parameter  $Ra$  (dependent factors), technological parameters of the coating, processing productivity and technological properties of modified grinding powders (independent factors) were obtained. It was established that the greatest influence on the relative consumption of cubonite grinding powder in grinding wheels is caused by the processing productivity (correlation coefficient 0.884) and such morphometric characteristics of the grains as the roughness of the grain projection (correlation coefficient 0.28) and the external specific surface of the powder (correlation coefficient 0.294). In the case of the roughness of the processed surface by the  $Ra$  parameter, the processing performance with a correlation coefficient of 0.856 and the specific perimeter of the grain projection with a correlation coefficient of 0.12 have the greatest influence on it. Proposals for using the obtained results are provided.*

**Keywords:** correlation, technological properties, grain, grinding powder, cubonite, combined coating, grinding wheels.

1. Полторацький В.Г., Бочечка О.О., Лавріненко В.І., Лещенко, Пасічний О.О., Білоченко В.П., Білорусець В.В. Формування комбінованого багатокомпонентного термостабільного зносостійкого покриття на поверхні зерен шліфпорошків абразивного призначення. *Інструментальне матеріалознавство. Зб. наук. праць*. 2021. Вип. 24. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля, НАН України, 2021. С. 296–307.
2. Lavrinenko V.I., Pasichnyi O.O., Poltoratskyi V.G., Solod V.Yu., Dobroskok V.L., Ostroverkh Ye.V. Some specific features inherent in the relation between the roughness parameters of a treated surface under grinding by wheels with a mixture of SHM grinding powders with superficially modified grains. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 6. P. 444–454.
3. Лавриненко В.И., Бочечка А.А., Полторацкий В.Г., Солод В.Ю. Модифицирование шлифпорошков синтетического алмаза для шлифовального инструмента. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2020. № 6. С. 56–59.
4. Полторацький В.Г., Бочечка О.О., Лавріненко В.І., Лещенко О.В., Білоченко В.П., Сільченко Я.Л., Пасічний О.О., Лисовенко С.О., Старик С.П., Білорусець В.В., Скрябін В.В., Скрябін В.О., Кошкін О.М. Фізико-хімічне складання комбінованих багатокомпонентних термостійких зносостійких покриттів на поверхні зерен шліфпорошків абразивного призначення. *Інструментальне матеріалознавство. Зб. наук. пр.* Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2023. Вип. 26. С. 180–194.
5. Дуда Т.М. Эффективные покрытия для порошков алмаза и КНБ, их структурные особенности и области промышленного применения. Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов. Киев: ИСМ НАН Украины, 2005. С. 86–95.
6. Лавріненко В.І., Ільницька Г.Д., Девіцький О.А., Смоквіна В.В., Пасічний О.О., Зайцева І.М., Іщенко О.В., Гайдай С.В. Дослідження впливу фізико-механічних характеристик алмазних зерен із металізованим покриттям на зносостійкість шліфувальних кругів. *Вісник Житомирського державного технологічного ун-ту. Серія: Технічні науки*. 2015. № 2 (73). С. 66–72.
7. Лавриненко В.И., Петасюк Г.А., Ильницкая Г.Д., Пасичный О.О. Алмазные шлифовальные инструменты с усовершенствованными алмазными зёрнами. *Оборудование и инструмент для профессионалов (металлообработка)*. 2016. № 3. С. 44–46.
8. Дуда Т.М., Крючкова А.Р. Особенности электроосаждения и свойства КЭП на основе кобальт-никелевого сплава. *Сверхтв. материалы*. 1983. № 5. С. 38–43.
9. Дуда Т.М., Чистяков Е.М., Шепелев А.А., Черных В.П., Чалый В.Т. Шлифовальные круги из алмазов с композиционным электролитическим покрытием. *Сверхтв. материалы*. 1980. № 4. С. 25–28.
10. Дуда Т.М., Чистяков Е.М., Шепелев А.А., Черных В.П., Чалый В.Т. Шлифовальные круги из алмазов с композиционным электролитическим покрытием. *Сверхтв. материалы*. 1980. № 4. С. 25–28.
11. Галицкий В.Н., Муровский В.А., Емельянов Б.М., Чистяков Е.М., Лищинский С.И., Землянский В.С. Влияние металлизированных алмазов на работоспособность инструмента на металлической связке. *Синт. алмазы*. 1971. Вып. 3. С. 24–26.
12. Зайцев А.Г., Дуда Т.М., Прудников Л.Е. Влияние металлизации на работоспособность кругов с ориентированными зёрнами. *Сверхтв. материалы*. 1983. № 2. С. 17–22.
13. Оситинская Т.Д., Чистяков Е.М., Погорельий Б.В. Определение толщины покрытия зерен металлизированного кубонита. *Синт. алмазы*. 1971. Вып. 2. С. 68–70.
14. Прудников Е.Л., Дуда Т.М., Зарицкий А.С. Абразивосодержащие электрохимические покрытия. Киев: Наук. думка, 1985. 216 с
15. Чистяков Е.М., Шепелев А.А., Дуда Т.М., Черных В.П. Инструмент из металлизированных сверхтвердых материалов. Киев: Наук. думка, 1982. 204 с
16. Чистяков Е.М., Кухаренко С.А. Определение толщины никелевого покрытия зерен алмаза. *Сверхтв. материалы*. 1983. Вып. 3. С. 48–50.
17. Petasyuk G.A. Methodological and application aspects of indirect analytical determination of coating thickness on metal-coated superabrasive grits. *J. Superhard Mater.* 2019. Vol. 41, no. 3. P. 201–209.
18. Dewettinck K., Deroo L., Messens W., Huyghebaert A. Agglomeration tendency during top-spray fluidized bed coating with gums. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie (Food Science & Technology)*. 1998. Vol. 31. P. 576–584.
19. Лучка М.В., Деревянко А.В., Забродский И.М., Евдокимов В.А., Райченко А.И. Метод определения толщины слоя покрытия при получении гранулированных композиционных порошков. *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих*

- процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2011. № 713. С. 19–22.
20. YUMPU DialInspect.OSM DialInspect.OSM – Vollstaedt-Diamant GmbH. <https://www.yumpu.com>
  21. Vollstaedt H., List E. Controlling the stability of superabrasive powders. *Proc. 4th Zhengzhou Int. Superhard Materials and Related Products Conf. (4th ZISC)*. Zhengzhou, P.R. China, 2003.
  22. Petasyuk G.A., Bochechka O.O. Generalized index of the shape-similarity of the diamond powders grains projection. *Powder Technology*. 2019. Vol. 353. P. 125–131.
  23. Petasyuk G.A., Bogatyreva G.P. Extrapolation analytical method for determination of outer specific surface of powders of superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2007. Vol. 30, no. 6. P. 375–383.
  24. Petasyuk G.A., Sirota Yu.V. Analytical determination of a number of particles per carat for diamond powders on the basis of an extrapolation-affine 3D grain model. *J. Superhard Mater.* 2012. Vol. 34, no. 3. P. 200–208.
  25. Petasyuk G.A. Interpretative and applied aspects of some morphological characteristics of superabrasive powders. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 2. P. 128–139.
  26. Petasyuk G.A., Bochechka O.O., Lavrinenko V.I., Poltoratsky V.G., Bilochenko V.P., and Sokolyuk D.V. The additive pycnometric method for assessment of the degree of coating of grinding powders made of superhard materials using the extrapolation-affinity 3D-model of the grain. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 3. P. 199–202
  27. Petasyuk G.A. Determining the thickness coating of grinding powders of synthetic diamond based on a specific-surface approach and using an extrapolation-affine 3d model of grain. *J. Coat. Sci. Techn.* 2022. vol. 9, 20–25.
  28. Перегуда О.В., Капустян О.А., Курилко О.Б. Статистична обробка даних: навч. посіб. Електронне видання, 2022. 103 с.
  29. Фетісов В.С. Пакет статистичного аналізу даних STATISTICA. Навч. посіб. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2018. 114 с.
  30. Дорбанд В., Котцауэр А., Кучке К.-Х., Петрушка К., Вебер С.С. Программирование на ФОРТРАНЕ. Справ. / под ред. Э.А Трахтенгерца, пер. с немецкого Х.Н. Шаллагова. Москва: Статистика, 1973. 96 с.
  31. Петасюк Г.А., Петасюк О.У. Компьютерно-программная система многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей LgArгох для применения в научно-прикладных задачах материаловедения. *Порошковая металлургия. Республ. межведом. сб. науч. тр.* Минск. 2008. Вып. 31. С. 58–63.

Надійшла до редакції 20.03.24

Після доопрацювання 22.04.24

Прийнята до опублікування 24.04.24