

# Інструмент, порошки, пасти

УДК 620.22-621.921.34:539.422.25

**Б. Т. Ратов<sup>1</sup>, В. А. Мечник<sup>2,\*</sup>, Е. С. Геворкян<sup>3</sup>,  
М. О. Бондаренко<sup>2</sup>, В. М. Колодніцький<sup>2,\*\*</sup>,  
Н. С. Ахметова<sup>1</sup>, Д. Л. Коростишевський<sup>2</sup>,  
Р. У. Баямирова<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>НАО “Казахський національний дослідницький технічний університет ім. К. І. Сатпаєва”, м. Алмати, Казахстан

<sup>2</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

<sup>3</sup>Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom, Poland

<sup>4</sup>Каспійський університет технології та інжинірингу ім. Ш. Єсенова, м. Актау, Казахстан

\*vlad.mechnik2019@gmail.com

\*\*vasylkolod56@gmail.com

## **Дослідження зносостійкості імпрегнованих коронок на основі композитів системи $S_{\text{алмаз}}-(WC-Co)-ZrO_2$ в разі буріння граніту**

*Встановлено залежності швидкості зносу алмазних імпрегнованих коронок, виготовлених з композиційних алмазовмісних матеріалів (КАМ)  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$  і  $25C_{\text{алмаз}}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$  методом іскро-плазмового спікання в інтервалі температури 20–1350 °С за тиску 30 МПа впродовж 3 хв, від швидкості обертання і осьового навантаження в разі буріння граніту. Показано, що додавання нанопорошку  $ZrO_2$  у кількості 2 % (за масою) до складу КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$  приводить до триразового зменшення швидкості зношування. Зносостійкість алмазних імпрегнованих коронок, виготовлених з КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$  і  $25C_{\text{алмаз}}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$ , найбільш висока за швидкості обертання 250 об/хв та осьового навантаження 900 кг, а найнижча – за швидкості обертання 750 об/хв та осьового навантаження 1250 кг. Виявлено, що підвищення зносостійкості алмазної імпрегнованої коронки, виготовленої з КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$ , в порівнянні з коронкою, виготовленою з КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ , обумовлено подрібненням зерен основної фази WC, зростанням відносної густини, границь міцності під час стиску і згинання, збільшенням в'язкості руйнування та формуванням міцного і надійного зчеплення алмазних зерен з твердосплавною матрицею. Отримані результати зі*

© Б. Т. РАТОВ, В. А. МЕЧНИК, Е. С. ГЕВОРКЯН, М. О. БОНДАРЕНКО, В. М. КОЛОДНІЦЬКИЙ, Н. С. АХМЕТОВА,  
Д. Л. КОРОСТИШЕВСЬКИЙ, Р. У. БАЯМИРОВА, 2024

*зносостійкості алмазних імпрегнованих коронок у поєднанні з дрібнозернистою структурою твердосплавної матриці і високим алмазоутриманням дозволяють застосовувати їх для виготовлення нових інструментів з підвищеними експлуатаційними властивостями для буріння міцних гірських порід.*

**Ключові слова:** алмазна імпрегнована коронка, композит, карбід вольфраму, кобальт, діоксид цирконію, зносостійкість, іскро-плазмове спікання.

## ВСТУП

Виконання вимог щодо підвищення надійності, зносостійкості та екологічної безпеки роботи алмазних інструментів під час буріння свердловин у твердих абразивних породах потребує створення нових композиційних алмазовмісних матеріалів (КАМ) із застосуванням наукомістких технологій [1]. Потреба в нових КАМ з набором підвищених службових показників підтримує постійний інтерес і до виробництва каменеобробних та інших інструментів. Для проходження свердловин у процесі розвідки корисних копалин у міцних і абразивних гірських породах широко застосовуються імпрегновані алмазні коронки [2–4]. КАМ, які застосовують для виготовлення алмазних імпрегнованих коронок, складаються з алмазних зерен, фаз карбіду вольфраму (WC) і кобальту (Co), або сплавів на їхній основі та зміцнюючої фази у вигляді боридів, нітридів, карбідів [5] і т.п. Спечені КАМ системи  $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$  мають властивості, істотно відмінні від властивостей кожного окремо взятого компонента, що входить до їхнього складу, і, водночас, частково мають властивості металу (наприклад, пластичність) та кераміки (наприклад, високу твердість, пружність та термостійкість). Ці властивості залежать від фазового складу, мікроструктури та морфології, які так само залежать від властивостей їхніх складових, способів та технологічних режимів спікання [6–9]. Деякі композити  $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$  мають такі механічні та експлуатаційні властивості, які недосяжні в традиційних матеріалах [10, 11], але й виявляють високу крихкість [12], що стримує їхнє використання у разі буріння міцних і абразивних гірських порід [13]. До недоліків цих КАМ слід віднести ще й погіршення в разі буріння твердих гірських порід характеристик міцності (твердості, границь міцності під час стиску та згинання, в'язкості руйнування), алмазоутримання [14] та зносостійкості [15]. Застосування композитів  $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$  у імпрегнованих алмазних коронках вже не забезпечує необхідний їхній ресурс в разі буріння граніту та інших міцних гірських порід. Підвищення механічних та експлуатаційних властивостей композитів  $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$  є важливим науковим та технічним завданням, оскільки його вирішення значно розширює сферу застосування алмазних імпрегнованих коронок.

Існує кілька можливих рішень проблеми підвищення зазначених вище властивостей КАМ і коронок на їхній основі. Перше – структурне подрібнення твердосплавної матриці, оскільки чим менший розмір зерен і чим сильніше розвинена зеренна структура, тим міцніша і твердіша матриця і, як наслідок КАМ. В [16, 17] було проведено серію експериментів і виявлено, що більший розмір зерна (понад 2 мкм) є причиною спонтанних мікротріщин, недостатніх механічних властивостей, зокрема низької зносостійкості. У зв'язку з цим ведуться роботи зі зменшення розміру зерна в матриці композиційних матеріалів до субмікронного або нанометрового рівня [18, 19]. Друге – додавання до складу КАМ певних сполук перехідних металів (боридів, карбідів, нітридів, оксидів), які є інгібіторами зерна основної фази WC під час спікання [20, 21]. Виявлено [22], що додавання наноксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) у кі-

лькості 0,5 % до складу композита WC–8Co<sup>1</sup>, спеченого методом порошкової металургії, забезпечило зменшення зерна WC з одночасним збільшенням його твердості та в'язкості руйнування. В [23] показано, що введення SiC до складу композита на основі мікропорошку Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> підвищує його зносостійкість. У [24] вдалося досягти підвищення границь міцності під час стиску і згинання з одночасним збільшенням зносостійкості зразка КАМ за рахунок введення до його складу добавки нанопорошку нітриду ванадію (VN) у кількості 2 %. У [25] виконано вивчення впливу добавки VN (в інтервалі від 0 до 10 %) на структуру і фізико-механічні властивості КАМ. В результаті встановлено оптимальну (4 %) концентрацію VN у складі композита, за якої відбувається покращення фізико-механічних властивостей. В [26, 27] показано, що значення твердості, в'язкості руйнування і міцності наноструктурних композитів WC–Co значно перевищують аналогічні показники мікроструктурних композитів. Додавання ультрадрібного порошку WC до композита WC–10Co позитивно впливає на його твердість, в'язкість руйнування та зносостійкість [28]. Виявлено [29], що збільшення вмісту Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> і VC у складі композита WC–6Co привело до зменшення зерна з одночасним підвищенням його твердості. Для подальшого поліпшення механічних властивостей аналізованих КАМ було проведено оптимізацію вмісту вуглецю [30–32] і кобальту [33–35] у твердосплавній матриці. Такі підходи забезпечують значний приріст властивостей міцності. Однак методи формування з використанням нанопорошків неминуче призводять до збільшення вартості композитів. Третє – застосування методу іскро-плазмового спікання (ІПС), який є ефективним методом високошвидкісного гарячого пресування [36, 37]. Суть технології ІПС полягає у високошвидкісному нагріванні порошків у графітовій прес-формі за рахунок пропускання мілісекундних імпульсів струму великої потужності. Спікання відбувається у вакуумі або інертному середовищі, в умовах застосування одновісного тиску. Високі швидкості нагріву дозволяють суттєво обмежувати швидкість зростання зерен, а можливість безпосередньо у процесі ІПС змінювати всі ключові параметри технологічного процесу (час та температуру нагріву, значення прикладеного тиску, швидкість нагрівання та охолодження) – ефективно керувати параметрами мікроструктури композиційних матеріалів. Метод ІПС дозволяє сформувати композит з густиною, що близька до теоретичного значення, і розміром зерен, близьким до розміру частинок вихідного порошку. Так, в [38] показано, що композити на основі нанопорошків ZrO<sub>2</sub>–WC, які сформовані методом іскро-плазмового спікання за температури 1350 °C і тиску 30 МПа, мають більш високі механічні властивості, ніж аналогічні композити без ZrO<sub>2</sub>. В [39] досліджено вплив нанопорошку WC на структуру та властивості нанокомпозита на основі ZrO<sub>2</sub>, спеченого методом ІПС. Показано, що найвищі значення твердості та зносостійкості мали композити, що містять 20 % WC.

Що стосується трибологічних випробувань алмазних імпрегнованих коронок на основі композитів C<sub>алмаз</sub>–(WC–Co)–ZrO<sub>2</sub>, сформованих методом іскро-плазмового спікання, в разі буріння гірських порід, то тут інформація відсутня зовсім. Винятком є нечисленні публікації щодо впливу добавки дибориду хрому CrB<sub>2</sub> на механічні та експлуатаційні властивості композитів системи C<sub>алмаз</sub>–(WC–Co) в разі шліфування пісковика та граніту на спеціальному стенді за навантаження 50 кг та швидкості обертання 4 м/с [5, 12–14, 20, 21, 40–43]. В [44] показано, що структура композитів C<sub>алмаз</sub>–(WC–Co)–ZrO<sub>2</sub> (роз-

---

<sup>1</sup> Тут і далі по тексту склад композита наведено у % (за масою).

мір зерна, щільність контакту алмаз–матриця, характер руйнування), сформованих методом ПС, багато в чому визначається вмістом  $ZrO_2$ . В [45] встановлено, що введення до складу композита  $25C_{алмаз}-70,5WC-4,5Co$  добавки  $ZrO_2$ , стабілізованого 3 %  $Y_2O_3$ , дозволяє досягти високих механічних характеристик з одночасним поліпшенням алмазоутримання. Також є дані про вплив  $CrB_2$  на механічні характеристики та зносостійкість КАМ на основі багатокомпонентних матриць, які демонструють досить низькі коефіцієнти тертя ( $\mu = 0,14-0,23$ ) [46, 47] і коефіцієнт зносу ( $k = 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ ) [48]. Тим не менш, ці результати вимагають подальших уточнень трибологічних властивостей, а також потребують спеціальних досліджень впливу складу КАМ, виготовлених методом іскро-плазмового спікання, на зносостійкість алмазної коронки в разі буріння міцної гірської породи. Отже, зносостійкість КАМ  $C_{алмаз}-(WC-Co)-ZrO_2$ , так само як і зносостійкість імпрегнованих коронок, виготовлених на їхній основі, до тепер не визначені, що робить актуальними подальші дослідження у даному напрямку. Із вищенаведеного випливає, що дослідження зносостійкості алмазної імпрегнованої коронки на основі композитів системи  $C_{алмаз}-(WC-Co)-ZrO_2$  є важливою науково-технічною проблемою, від вирішення якої залежить розробка ефективних інструментів для буріння твердих і абразивних гірських порід.

Метою цієї роботи є дослідження впливу добавки нанопорошку  $ZrO_2$ , стабілізованого 3 %  $Y_2O_3$  на зносостійкість алмазних імпрегнованих коронок на основі композитів  $C_{алмаз}-(WC-Co)$ , сформованих методом ПС в інтервалі температури 20–1350 °С за тиску 30 МПа, в разі буріння граніту за різних умов.

### ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості досліджуваних об'єктів було вибрано коронки алмазні імпрегновані 1 і 2 типу БС-04 діаметром 59 мм (зовнішній діаметр – 59 мм, внутрішній – 43 мм). Коронка 1, виготовлена на основі КАМ складу  $25C_{алмаз}-70,5WC-4,5Co$ , а коронка 2 –  $25C_{алмаз}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$ . Для приготування сумішей з метою формування методом ПС зразків КАМ діаметром 10 мм і товщиною 5 мм використовували порошки алмазу (АС160Т), зернистістю 315/250 (середній розмір зерна – ~ 297 мкм), карбиду вольфраму (Україна) із середнім розміром частинок порошку 2–8 мкм, кобальту марки ПК-1у (ГОСТ 9721–79) із середнім розміром частинок порошку 2–3 мкм і діоксиду цирконію частково стабілізованого 3 %  $Y_2O_3$  (Франція). Зерна  $ZrO_2$  мали розкид за розмірами від 50 нм до 1 мкм. Порошкову суміш для спікання зразків КАМ складу  $25C_{алмаз}-70,5WC-4,5Co$  для коронки 1 готували таким способом. Спочатку порошки  $Co$  і  $WC$  в необхідній кількості змішували в спиртовому середовищі до рівномірного змішування компонентів. До приготовленої суміші добавляли в потрібній кількості алмазний порошок і перемішували в спиртовому середовищі до рівномірного змішування компонентів і висушували в сушильній шафі. Порошкову суміш для спікання зразків КАМ складу  $25C_{алмаз}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$  для коронки 2 готували іншим способом. Спочатку порошки  $ZrO_2$  і  $Co$  в необхідній кількості змішували в спиртовому середовищі до рівномірного змішування компонентів. Після цього до приготовленої суміші добавляли в необхідній кількості порошок  $WC$  і змішували в спиртовому середовищі до рівномірного змішування компонентів і висушували в сушильній шафі. До приготовленої суміші добавляли в необхідній кількості алмазний порошок з подальшим змішуванням до рівномірного змішування компонентів і висушували в сушильній шафі.

Спiкання зразкiв здiйснювали в графiтових прес-формах методом ПС в iнтервалi температур 20–1350 °С за тиску 30 МПа протягом 3 хв [49]. Електричний струм становив 5000 А, напруга – 5 В, швидкiсть нагрiвання – 300 град/хв. Спiкання здiйснювали у вакуумi (6 Па). Температуру вимiрювали за допомогою пiрометра CHINOIR-AH2, сфокусованого на поверхнi графiтової прес-форми. Робочi поверхнi прес-форми змащували нiтридом бору для запобiгання взаємодiї мiж матерiалом, що пресується, i графiтом. Спеченi зразки КАМ закрiплювали методом пайки до сталевого корпусу алмазних коронок 1 i 2.

Випробування алмазних iмпрегнованих коронок на зносостiйкiсть здiйснювали на спецiальному стендi на базi радiально-свердлильного верстата 2М57, оснащеного двигуном потужнiстю 13 кВт, гiдравлiчною системою подачi i системою промивки свердловини в разi бурiння гранiту Коростишевського родовища (Україна) Х категорiї буримостi (твердiсть за штампом 2,37 ГПа, абразивнiсть 43). Бурiння здiйснювали в блоцi гранiту на глибину 0,5 м за один прохiд. Для кожної алмазної коронки проходка складалася з чотирьох проходiв i становила 2 м. Бурiння гранiтних блокiв 100×100×500 мм здiйснювали за осьового навантаження 800, 900, 1000 i 1250 кг i швидкостi обертання 250, 500, 750 и 1250 об/хв. Пiсля кожного циклу рiзучу частину (алмазовмiсну частину) промивали етиловим спиртом i визначали вагу алмазних iмпрегнованих коронок на аналітичній вазi з точнiстю до 0,01 г. Швидкiсть зносу алмазної iмпрегнованої коронки визначали за формулою [50]

$$v = \frac{\Delta m}{H},$$

де  $v$ , мг/мм – швидкiсть зносу;  $\Delta m$ , мг – втрата маси до i пiсля випробування;  $H$ , мм – глибина бурiння.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛIДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Залежностi швидкостi зносу  $v$  алмазних iмпрегнованих коронок 1 i 2 вiд швидкостi обертання  $\omega$  в разi бурiння гранiтних блокiв за осьового навантаження  $P = 1000$  кг наведено на рис. 1. За такої умови залежностi швидкостi зносу  $v$  для коронок 1 i 2 мають три характерних iнтервали, якi вiдрiзняються кутом нахилу. На першому iнтервалi  $250 \leq \omega \leq 500$  об/хв спостерiгали збiльшення  $v$  для коронки 1 вiд 0,15 до 0,20 мг/мм i для коронки 2 – вiд 0,05 до 0,07 мг/мм. Другий iнтервал ( $500 \leq \omega \leq 750$  об/хв) характеризується бiльш значним зростанням швидкостi зносу. Так, в iнтервалi  $500 \leq \omega \leq 750$  об/хв швидкiсть зносу  $v$  зростає для коронки 1 до значень 0,40 мг/мм i для коронки 2 – до 0,13 мг/хв. Третiй iнтервал ( $750 \leq \omega \leq 1250$  об/хв) характеризується зменшенням швидкостi зносу  $v$  для коронок 1 вiд 0,40 до 0,35 мг/хв i для коронки 2 – вiд 0,13 до 0,11 мг/хв. Зменшення швидкостi зносу  $v$  для коронок 1 i 2 на цьому iнтервалi зумовлено утворенням оксидних плiвок на поверхнi твердосплавної матрицi КАМ. Найбiльшi значення швидкостi зносу  $v$  для коронок 1 i 2 спостерiгаються за  $\omega = 750$  об/хв, а найменшi – за  $\omega = 250$  об/хв. Водночас значення  $v$  для коронки 2 на кожній дiлянцi приблизно в 3 рази меншi за аналогічнi значення для коронки 1.

Залежностi швидкостi зносу  $v$  алмазних iмпрегнованих коронок 1 i 2 вiд осьового навантаження  $P$  в разi бурiння гранiтних блокiв за швидкостi обертання 750 об/хв наведено на рис. 2. Аналіз рисунка показав, що збiльшення осьового навантаження вiд 800 до 900 кг спричиняє зменшення швидкостi зносу  $v$  для коронки 1 вiд 0,25 до 0,20 мг/мм i для коронки 2 – вiд 0,08 до

0,07 мг/мм. У разі збільшення навантаження від 900 до 1000 кг відбувається різке збільшення швидкості зносу  $v$  для коронки 1 від 0,20 до 0,40 мг/мм і для коронки 2 – від 0,07 до 0,13 мг/мм. За подальшого збільшення осьового навантаження до 1250 кг значення швидкості зношування  $v$  продовжують збільшуватися, але з меншою інтенсивністю, ніж на попередньому інтервалі. Найбільші значення швидкості зносу для коронки 1 і 2 спостерігали за  $P = 1250$  кг, а найменші – за  $P = 900$  кг.

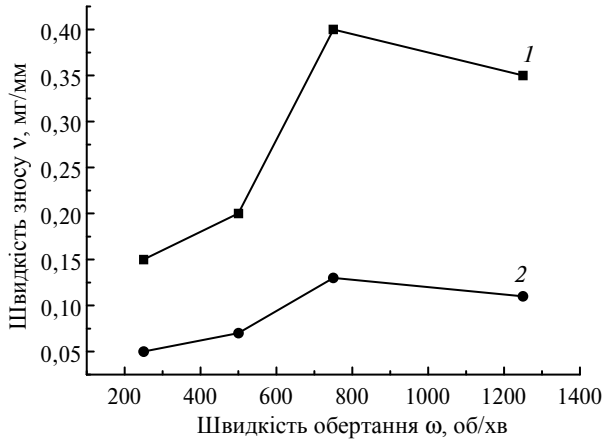


Рис. 1. Залежності швидкості зносу  $v$  алмазних імпрегнованих коронок 1 і 2 в разі буріння гранітних блоків від швидкості обертання  $\omega$  за навантаження 1000 кг.

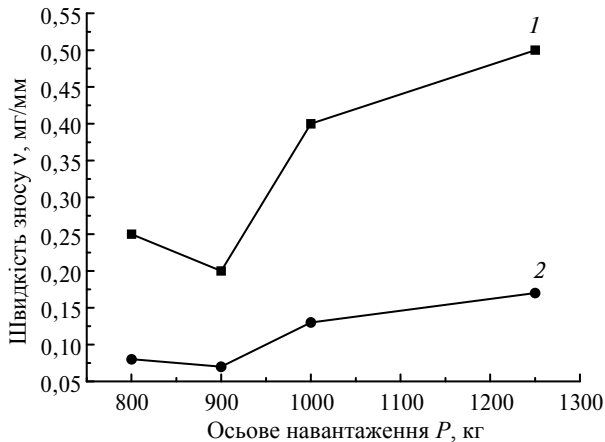


Рис. 2. Залежності швидкості зносу алмазних імпрегнованих коронок 1 і 2 у разі буріння граніту від осьового навантаження за швидкості обертання 750 об/хв.

За таких умов значення швидкості зносу  $v$  для коронки 2 в зазначеному вище діапазоні зміни навантаження менше в 2,5 рази швидкості зносу  $v$  для коронки 1. Зокрема, збільшення  $P$  від 900 до 1250 кг призводить до зростання значень з 0,20 до 0,50 мг/мм для коронки 1 і з 0,07 до 0,17 мг/мм для коронки 2.

Зменшення значень швидкості зношування  $v$  коронки 2 порівняно з коронкою 1 обумовлено тим, що додавання  $ZrO_2$  до складу зразка КАМ 25C<sub>алмаз</sub>-70,5WC-4,5Co забезпечує трансформаційний механізм зміцнення матеріалу твердосплавної матриці, перетвореннями її структури на більш щільну, а також формуванням більш дрібнозернистої структури твердосплавної матриці з тонкими прошарками кобальтової зв'язки між зернами WC [51]. В результаті цього

го в композиті  $25C_{\text{алмаз}}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$  для коронки 2 відбувається зростання відносної густини  $\rho_{\text{відн}}$  з 0,948 до 0,990, збільшення границь міцності під час стиску  $R_{cm}$  від  $4950 \pm 110$  до  $5600 \pm 120$  МПа і згинання  $R_{bm}$  від  $1935 \pm 80$  до  $2660 \pm 115$  МПа. Також спостерігається збільшення в'язкості руйнування  $K_{Ic}$  від  $13,8 \pm 0,71$  до  $16,9 \pm 0,76$  МПа $\cdot$ м<sup>0,5</sup> з одночасним покращенням міцності зчеплення алмазних зерен з твердосплавною матрицею [52]. Отже, збільшення швидкості обертання та осьового навантаження значно впливає на зносостійкість алмазних імпрегнованих коронок під час буріння граніту.

Отже, експериментально підтверджено, що застосування композита  $25C_{\text{алмаз}}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$ , виготовленого методом ППС в інтервалі температур 20–1350 °С за тиску 30 МПа протягом 3 хв, у виробництві алмазних імпрегнованих коронок дозволяє значно підвищити їхню зносостійкість в разі буріння граніту.

## ВИСНОВКИ

В роботі представлено результати дослідження впливу добавки нанопорошку  $ZrO_2$  на зносостійкість алмазних імпрегнованих коронок на основі композитів  $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$ , сформованих методом ППС в інтервалі температур 20–1350 °С за тиску 30 МПа, в разі буріння граніту за різних умов.

Встановлено залежності швидкості зносу алмазних імпрегнованих коронок, виготовлених з КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$  і  $25C_{\text{алмаз}}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$  методом ППС в інтервалі температур 20–1350 °С за тиску 30 МПа впродовж 3 хв, від швидкості обертання та осьового навантаження в разі буріння граніту.

Додавання мікропорошку  $ZrO_2$  у кількості 2 % до складу КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$  приводить до триразового зменшення швидкості зношування. Зносостійкість алмазних імпрегнованих коронок, виготовлених з КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$  і  $25C_{\text{алмаз}}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$ , найбільш висока за швидкості обертання 250 об/хв та осьового навантаження 900 кг, а найнижча – за швидкості обертання 750 об/хв та осьового навантаження 1250 кг.

Збільшення зносостійкості алмазної імпрегнованої коронки, виготовленої з КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-68,62WC-4,38Co-2ZrO_2$ , в порівнянні з коронкою, виготовленою з КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ , обумовлено, в першу чергу, подрібненням зерен, оскільки  $ZrO_2$  є інгібітором зерна основної фази WC під час спікання. По-друге, збільшення зносостійкості у разі введення до складу КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$  добавки  $ZrO_2$  зумовлено зростанням відносної густини  $\rho_{\text{відн}}$  з 0,948 до 0,990, збільшенням границь міцності під час стиску  $R_{cm}$  від  $4950 \pm 110$  до  $5600 \pm 120$  МПа і згинання  $R_{bm}$  від  $1935 \pm 80$  до  $2660 \pm 115$  МПа та збільшенням в'язкості руйнування  $K_{Ic}$  від  $13,8 \pm 0,71$  до  $16,9 \pm 0,76$  МПа $\cdot$ м<sup>0,5</sup>. По-третє, збільшення зносостійкості у разі введення до складу КАМ  $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$  добавки  $ZrO_2$  зумовлено також більш міцним і надійним зчепленням алмазних зерен із твердосплавною матрицею.

Отримані результати зі зносостійкості алмазних імпрегнованих коронок у поєднанні з дрібнозернистою структурою твердосплавної матриці, міцним і надійним алмазоутриманням дозволяють застосовувати їх для виготовлення нових інструментів з підвищеними експлуатаційними властивостями для буріння твердих і абразивних гірських порід.

## ФІНАНСУВАННЯ

Робота виконана за підтримки Комітету науки Міністерства освіти і науки Республіки Казахстан (Грант № AP08857201) і Міністерства освіти та науки України (Номер державної реєстрації № 0117U000391).

## КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

B. T. Ratov<sup>1</sup>, V. A. Mechnik<sup>2</sup>, E. S. Gevorkyan<sup>3</sup>,  
N. A. Bondarenko<sup>2</sup>, V. M. Kolodnitskyi<sup>2</sup>, N. S. Akhmetova<sup>1</sup>,  
D. L. Korostyshevskyi<sup>2</sup>, R. U. Bayamirova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Satpayev University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Bakul Institute for Superhard Materials,

National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Kazimierz Pułaski University of Technology and Humanities  
in Radom, Radom, Poland

<sup>4</sup>Caspian University of Technology and Engineering

named after Sh. Yesenova,

Aktau, Kazakhstan

A study of the wear resistance of impregnated crowns  
based on composites of the  $C_{\text{diamond}}-(WC-Co)-ZrO_2$  system  
in granite drilling

*The dependence of the wear rate of diamond impregnated crowns made of composite diamond-containing materials (CDMs)  $25C_{\text{diamond}}-70.5WC-4.5Co$  and  $25C_{\text{diamond}}-68.62WC-4.38Co-2ZrO_2$  by spark-plasma sintering in the temperature range 20–1350 °C at a pressure of 30 MPa for 3 min on the rotational speed and axial load in granite drilling was determined. It is shown that the addition of  $ZrO_2$  nanopowder in the amount of 2 wt % to the composition of CDMs  $25C_{\text{diamond}}-70.5WC-4.5Co$  leads to a threefold decrease in the wear rate. The wear resistance of diamond impregnated crowns made of CDMs  $25C_{\text{diamond}}-70.5WC-4.5Co$  and  $25C_{\text{diamond}}-68.62WC-4.38Co-2ZrO_2$  is the highest at a rotational speed of 250 rpm and an axial load of 900 kg, and the lowest at a rotational speed of 750 rpm and an axial load of 1250 kg. It has been found that the increase in wear resistance of a diamond impregnated crown made of CDMs  $25C_{\text{diamond}}-68.62WC-4.38Co-2ZrO_2$ , compared to a crown made of CDMs  $25C_{\text{diamond}}-70.5WC-4.5Co$ , is due to the grinding of WC main phase grains, increase in relative density, compressive and bending strengths, increase in fracture toughness, and formation of strong and reliable adhesion of diamond grains to the carbide matrix. The results obtained on the wear resistance of diamond impregnated bits in combination with the fine-grained structure of the carbide matrix and high diamond retention allow their use for the manufacture of new tools with improved performance properties for drilling hard rocks.*

**Keywords:** diamond impregnated crown, composite, tungsten carbide, cobalt, zirconium dioxide, wear resistance, spark-plasma sintering.

1. Chon K.S., Takahashi H., Namba Y. Wear inspection of a single-crystal diamond tool used in electroless nickel turning. *Opt. Eng.* 2014. Vol. 53, art. 034102.
2. Sun W., Gao H., Tan S., Wang Z., Duan L. Wear detection of WC–Cu based impregnated diamond bit matrix based on SEM image and deep learning. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2021. Vol. 98, art. 105530.
3. Song D., Ren Z., Yang Y., Chen Y., Nie G., Tan L., Peng H., Li Z., Chen X., Li M. Drilling performance analysis of impregnated micro bit. *Mech. Sci.* 2022. Vol. 13, no. 2. P. 867–875.
4. He M., Li N., Zhu J., Chen Y. Advanced prediction for field strength parameters of rock using drilling operational data from impregnated diamond bit. *J. Pet. Sci. Eng.* 2020. Vol. 187, art. 106847.
5. Bondarenko N.A., Mechnik V.A. The influence of transition area diamond-matrix on wear resistance and operation properties of drilling tool produced by ISM. *SOCAR Proc.* 2011, no. 2. P. 18–24.
6. Ratov B.T., Mechnik V.A., Bondarenko M.O., Kolodnitskyi V.M. Physical and mechanical properties of WC–Co–CrB<sub>2</sub> matrices of composite diamond-containing materials sintered by vacuum hot pressing for drilling tool applications. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 4. P. 240–251.



7. Wang X., Hwang K.S., Koopman M., Fang Z.Z., Zhang L. Mechanical properties and wear resistance of functionally graded WC–Co. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2013. Vol. 36. P. 46–51.
8. Tarrado J.M., Roa J.J., Valle V., Marshall M.J., Lanes L. Fracture and fatigue behavior of WC–Co and WC–CoNi cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2015. Vol. 49, no. 3. P. 184–191.
9. Pero R., Maizza G., Montanari R., Ohmura T. Nano-indentation properties of tungsten carbide-cobalt composites as a function of tungsten carbide crystal orientation. *Materials.* 2020. Vol. 13, no. 9, art. 2137.
10. Tyrala D., Romanski A., Konstanty J. The effects of powder composition on microstructure and properties of hot-pressed matrix materials for sintered diamond tools. *J. Mater. Eng. Perform.* 2020. Vol. 29. P. 1467–1472.
11. Konstanty J., Romanski A. New nanocrystalline matrix materials for sintered diamond tools. *Mater. Sci. Appl.* 2012. Vol. 3, no. 11. P. 779–783.
12. Ratov B.T., Mechnik V.A., Gevorkyan E.S., Matijosius J., Kolodnitskyi V.M., Chishkala V.A., Kuzin N.O., Siemiatkowski Z., Rucki M. Influence of CrB<sub>2</sub> additive on the morphology, structure, microhardness and fracture resistance of diamond composites based on WC–Co matrix. *Materialia.* 2022. Vol. 25, art. 101546.
13. Ratov B.T., Fedorov B.V., Syzdykov A.Kh., Zakenov S.T., Sudakov A.K. The main directions of modernization of rock-destroying tools for drilling solid mineral resources. *Int. Multidisciplinary Sci. GeoConference. SGEM. Sofia.* 2021. Vol. 21. Sect. 1.2: Exploration and Mining. P. 503–514.
14. Bondarenko N.A., Novikov N.V., Mechnik V.A., Olejnik G.S., Vereshchaka V.M. Structural peculiarities of highly wear-resistant superhard composites of the diamond–WC–6Co carbide system. *Sverkhтвердые Материалы.* 2004. Vol. 26, no. 6. P. 3–15.
15. Aleksandrov V.A., Zhukovsky A.N., Mechnik V.A. Temperature field and wear of inhomogeneous diamond wheel at convective heat exchange. *Trenie Iznos.* 1994. Vol. 15, no. 1. P. 27–35.
16. Todd R.I., Derby B. Thermal stress induced microcracking in alumina–20% SiC<sub>p</sub> composites. *Acta Mater.* 2004. Vol. 52, no. 6. P. 1621–1629.
17. Nohut S. Prediction of crack-tip toughness of alumina for given residual stresses with parallel-bonded-particle model. *Comput. Mater. Sci.* 2011. Vol. 50, no. 4. P. 1509–1519.
18. Su W., Zou J., Sun L. Effects of nano-alumina on mechanical properties and wear resistance of WC–8Co cemented carbide by spark plasma sintering. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2020. Vol. 92, art. 105337.
19. Mechnik V.A., Bondarenko M.O., Kolodnitskyi V.M., Zakiev V.I., Zakiev I.M., Kuzin M.O., Gevorkyan E.S. Influence of diamond–matrix transition zone structure on mechanical properties and wear of sintered diamond-containing composites based on Fe–Cu–Ni–Sn matrix with varying CrB<sub>2</sub> content. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2021. Vol. 100, art. 105655.
20. Novikov N. V., Bondarenko N. A., Zhukovskii A. N., Mechnik V. A. The effect of diffusion and chemical reactions on the structure and properties of drill bit inserts. 1. Kinetic description of systems C<sub>diamond</sub>–VK6 and C<sub>diamond</sub>–(VK6–CrB<sub>2</sub>–W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>). *Fizicheskaya Mezomekhanika.* 2005. Vol. 8, no. 2. P. 99–106.
21. Bondarenko N.A., Mechnik V.A. Drilling oil and gas wells by ISM diamond tools. *SOCAR Proc.* 2012. no. 3. P. 6–12.
22. Sirota V.V., Gevorkyan E.S., Kovaleva M.G., Ivanisenko V.V. Structure and properties of nanoporous ceramic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obtained by isostatic pressing. *Glass Ceram.* 2013. Vol. 69, nos. 9–10. P. 342–345.
23. Gevorkyan E., Rucki M., Panchenko S., Sofronov D., Chalko L., Mazur T. Effect of SiC addition to Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics used in cutting tools. *Materials.* 2020. Vol. 13, no. 22, art. 5195.
24. Mechnik V.A., Bondarenko N.A., Kuzin N.O., Gevorkyan E.S., Influence of the addition of vanadium nitride on the structure and specifications of a diamond–(Fe–Cu–Ni–Sn) composite system. *J. Frict. Wear.* 2018. Vol. 39, no. 2. P. 108–113.
25. Ratov B.T., Mechnik V.A., Bondarenko M.O., Kolodnitskyi V.M., Kuzin M.O., Gevorkyan E.S., Chishkala V.A. Effect of vanadium nitride additive on the structure and strength characteristics of diamond-containing composites based on the Fe–Cu–Ni–Sn matrix, formed by cold pressing followed by vacuum hot pressing. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 6. P. 423–434.
26. García J., Ciprés V.C., Blomqvist A., Kaplan B. Cemented carbide microstructures: A review. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2019. Vol. 80. P. 40–68.

27. Zhao S.X., Song X.Y., Zhang J.X., Liu X.M. Effects of scale combination and contact condition of raw powders on SPS sintered near-nano crystalline WC–Co alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2008. Vol. 473. P. 323–329.
28. Lu Z., Du J., Sun Y., Su G., Zhang C., Kong X., Kong X. Effect of ultrafine WC contents on the microstructures, mechanical properties and wear resistances of regenerated coarse grained WC–10Co cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2021. Vol. 97, art. 105516.
29. Yin C., Peng Y., Ruan J., Zhao L., Zhang R., Du Y. Influence of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> and VC content on WC grain size, WC shape and mechanical properties of WC–6.0Co wt.% Co cemented carbides. *Materials*. 2021. Vol. 14, art. 1551.
30. Kim S., Han S.H., Park J.K., Kim H.E. Variation of WC grain shape with carbon content in the WC–Co alloys during liquid-phase sintering. *Scripta Mater.* 2003. Vol. 48, no. 5. P. 635–639.
31. Yang Q.M., Yu S.S., Zheng C.L., Liao J.X., Li J.Z., Chen L.Y., Guo S.D., Ye Y.W., Chen H. Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of WC–10Co cemented carbides with plate-like WC grain. *Ceram. Int.* 2020. Vol. 46, no. 2. P. 1824–1829.
32. Gu L., Huang J., Xie C. Effects of carbon content on microstructure and properties of WC–20Co cemented carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2014. Vol. 42. P. 228–232.
33. Liu K., Wang Z.H., Yin Z.B., Cao L.Y., Yuan J.T. Effect of Co content on microstructure and mechanical properties of ultrafine grained WC–Co cemented carbide sintered by spark plasma sintering. *Ceram. Int.* 2018. Vol. 44, no. 15. P. 18711–18718.
34. Wang H., Webb T., Bitler J.W. Study of thermal expansion and thermal conductivity of cemented WC–Co composite. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2015. Vol. 49. P. 170–177.
35. Fang Z.Z. Correlation of transverse rupture strength of WC–Co with hardness. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2005. Vol. 23, no. 2. P. 119–127.
36. Hu Z.Y., Zhang Z.H., Cheng X.W., Wang F.C., Zhang Y.F., Li S.L. A review of multi-physical fields induced phenomena and effects in spark plasma sintering: Fundamentals and applications. *Mater. Des.* 2020. Vol. 191, art. 108662.
37. Tokita M. Progress of spark plasma sintering (SPS) method, systems, ceramics applications and industrialization. *Ceramics*. 2021. Vol. 4, no. 2. P. 160–198.
38. Gevorkyan E., Melnik O., Chishkala V. The obtaining of high-density specimens and analysis of mechanical strength characteristics of a composite based on ZrO<sub>2</sub>–WC nanopowders. *Nanoscale Res. Lett.* 2014. Vol. 9, no 1, art. 355.
39. Gevorkyan E., Prikhna T., Vovk R., Rucki M., Siemiątkowski Z., Kucharczyk W., Chishkala V., Chałko L. Sintered nanocomposites ZrO<sub>2</sub>–WC obtained with field assisted hot pressing. *Compos. Struct.* 2021. Vol. 259, no 1, art. 113443.
40. Kolodnits'kyi, V.M., Bagirov O.E. On the structure formation of diamond-containing composites used in drilling and stone-working tools (A review). *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 1. P. 1–17.
41. Ratov B.T., Bondarenko N.A., Mechnik V.A., Strelchuk V.V., Prikhna T.A., Kolodnitsky V.M., Nikolenko A.S., Lytvyn P.M., Danylenko L.M., Moshchil V.T., Borash A.R., Muzaparova A.B. A study of the structure and strength properties of the WC–Co drill insert with different CrB<sub>2</sub> content sintered by vacuum hot pressing. *SOCAR Proc.* 2022. no. 1. P. 37–46.
42. Ratov B.T., Bondarenko M.O., Mechnik V.A., Strelchuk V.V., Prikhna T.A., Kolodnitskyi V.M., Nikolenko A.S., Lytvyn P.M., Danylenko I.M., Moshchil V.E., Gevorkyan E.S., Kosminov A.S. Structure and properties of WC–Co composites with different CrB<sub>2</sub> concentrations, sintered by vacuum hot pressing, for drill bits. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 5. P. 344–354.
43. Ratov B.T., Mechnik V.A., Bondarenko N.A., Strelchuk V.V., Prikhna T.A., Kolodnitskyi V.M., Nikolenko A.S., Lytvyn P.M., Danylenko I.M., Moshchil V.E., Gevorkyan E.S., Chishkala V.A. Phase formation and physicomechanical properties of WC–Co–CrB<sub>2</sub> composites sintered by vacuum hot pressing for drill tools. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 1. P. 1–11.
44. Mechnik V.A., Rucki M., Ratov B.T., Bondarenko N.A., Gevorkyan E.S., Kolodnitskyi V.M., Chishkala V.A., Morozova O.M., Kulich V.G. Structure of C<sub>diamond</sub>–(WC–6Co)–ZrO<sub>2</sub> composites formed by electrical plasma spark sintering. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 5. P. 302–322.
45. Ratov B. T., Mechnik V. A., Rucki M., Gevorkyan E. S., Bondarenko N. A., Kolodnitskyi V. M., Chishkala V. A., Kudaikulova G. A., Muzaparova A. B., Korostyshevskiy D. L. C<sub>diamond</sub>–(WC–Co)–ZrO<sub>2</sub> composite materials with improved mechanical and adhesive properties. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 2. P. 103–117.
46. Novikov M.V., Mechnykh V.A., Bondarenko M.O., Lyashenko B.A., Kuzin M.O. Composite materials of diamond–(Co–Cu–Sn) system with improved mechanical characteristics. Part 1.

- The influence of hot re-pressing on the structure and properties of diamond-(Co-Cu-Sn) composite. *J. Superhard Mater.* 2015. Vol. 37, no. 6. P. 402–416.
47. Mechnik V.A., Bondarenko N.A., Kolodnitskyi V.M., Zakiev V.I., Zakiev I.M., Ignatovich S.R., Yutskevych S.S. Mechanical and tribological properties of Fe-Cu-Ni-Sn materials with different amounts of CrB<sub>2</sub> used as matrices for diamond-containing composites. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 4. P. 251–263.
48. Mechnik V.A., Bondarenko N.A., Kolodnitskyi V.M., Zakiev V.I., Zakiev I.M., Gevorkyan E.S., Chishkala V.A., Kuzin N.O. Effect of CrB<sub>2</sub> on the microstructure, properties, and wear resistance of sintered composite and the diamond retention in Fe-Cu-Ni-Sn matrix. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 3. P. 175–190.
49. Kodash V.Y., Gevorkian E.S. Tungsten carbide cutting tool materials: *Pat. 6617271 B1 USA*: IC C04B 35/56. Publ. 09.09.2003.
50. Song D., Ren Z., Yang Y., Chen Y., Nie G., Tan L., Peng H., Li Z., Chen X., Li M., Ren H., Zuo L. Drilling performance analysis of impregnated micro bit. *Mech. Sci.* 2022. Vol. 13, no. 2. P. 867–875.
51. Ратов Б.Т., Мечник В.А., Бондаренко М.О., Руцький М., Геворкян Е.С., Колодніцький В.М., Калжанова А.Б., Сундетова П.С., Утепов З.Г. Фазоутворення і алмазоутримання в композитах C<sub>алмаз</sub>-(WC-Co)-ZrO<sub>2</sub>, спечених методом іскро-плазмового спікання. *Надтверді матеріали*. 2024. № 2. С. 39–58.
52. Ратов Б.Т., Мечник В.А., Бондаренко М.О., Колодніцький В.М., Прихна Т.О., Мошіль В.Є., Нерубацький В.П., Кальжанова А.Б., Баямирова Р.У., Тогашева А.Р., Сарбопеєва М.Д. Вплив ZrO<sub>2</sub> на характеристики міцності матеріалу матриці композитів C<sub>алмаз</sub>-(WC-Co), виготовлених методом іскро-плазмового спікання. *Надтверді матеріали*. 2024. № 3. С. 17–31.

Надійшла до редакції 11.01.24

Після доопрацювання 25.01.24

Прийнята до опублікування 31.01.24