

Є. А. Коровяка*, С. О. Шипунов

Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”,
м. Дніпро, Україна

*koroviaka.ye.a@ntnu.one

Вдосконалення технології бурових робіт під час ударно-обертального буріння

Розроблено двошарову конструкцію різальної вставки бурового інструменту з використанням твердого сплаву WC–Co з різними вмістом кобальту та розміром зерна карбіду вольфраму сплаву з чіткою межею між зонами різної зернистості, що дозволило підвищити зносостійкість і ударну міцність інструменту та підвищити до 50 % швидкість ударно-обертального буріння твердих порід. Верхній шар різальної вставки складає крупнозерниста структура (6 мкм) з високою зносостійкістю, а нижній шар – дрібнозерниста структура (2 мкм) із підвищеною ударною в'язкістю. Результати дослідження можуть бути застосовані у гірничодобувній, нафтогазовій та будівельній галузях для підвищення ефективності буріння.

Ключові слова: перфатор, бурова коронка, різальна вставка, металокерамічний сплав, бурова установка.

ВСТУП

Ударно-обертальне буріння є одним із ключових методів механічного руйнування гірських порід, що знаходить застосування у гірничодобувній промисловості, нафтогазовому секторі та будівництві. Його ефективність обумовлена поєднанням ударного навантаження та обертального руху, що дозволяє долати навіть найтвердіші геологічні формації. Однак сучасні виклики – зростання глибин свердловин, ускладнення умов видобутку корисних копалин і високі вимоги до екологічної безпеки – вимагають інноваційного підходу до вдосконалення технологій бурових робіт.

Основні обмеження традиційних методів пов'язані зі швидким зносом інструментів, неефективним розподілом енергії та високими експлуатаційними витратами. Наприклад, під час буріння твердих порід стандартні різальні вставки часто виходять з ладу через критичні ударні навантаження, що змушує зупиняти процес для заміни обладнання. Крім того, енергоємність таких робіт залишається високою, що суттєво впливає на собівартість проектів.

Вдосконалення технології ударно-обертального буріння сприяє підвищенню продуктивності, зниженню собівартості робіт та мінімізації впливу на довкілля [1]. Інноваційні рішення, такі як автоматизація, використання сучасних матеріалів і новітніх систем керування, є ключовими для розвитку галузі та забезпечення її сталого зростання.

Для оцінки ефективності процесу буріння використовують різні показники, серед яких найбільш інформативним вважається швидкість буріння [2].

Під час буріння свердловин машинами ударно-обертальної дії породоруйнівний інструмент піддається одночасній дії декількох навантажень:

– динамічних, які впливають періодично і з великою частотою, що сприяє ефективності руйнування породи та зниженню зношування лез у порівнянні обертальним бурінням;

– статичного осьового зусилля, внаслідок дії якого на інструмент заглиблюється у вибій різальна кромка;

– обертального моменту, що викликає сколювання породи, яка знаходиться попереду заглиблених різців.

Перераховані вище навантаження визначатимуть ефективність бурових робіт. У [3] було зроблено спробу врахувати дії цих навантажень за допомогою коефіцієнта тертя інструменту об породу, діаметра свердловини, кута загострення леза інструменту, енергії одиничного удару та частоти ударів на хвилину.

З аналізу розглянутих залежностей для оцінки швидкості буріння, видно, що кожна з них дозволяє врахувати одночасно декілька важливих критеріїв, причому очевидним є низька точність прогнозу для умов конкретних кар'єрів [4]. Тому найбільш перспективним напрямком для прогнозування продуктивності бурових робіт є встановлення емпіричних залежностей для конкретних геолого-технічних умов.

Тверді сплави є унікальними композиційними матеріалами, які поєднують властивості, необхідні для роботи в умовах високих навантажень, абразивного зносу та екстремальних температур. Їхні основні характеристики роблять їх незамінними в багатьох галузях промисловості. Також тверді сплави широко застосовують у виробництві швидкорізальних інструментів для обробки чавунів, бронз, латунів та кераміки, бурових різальних інструментів та армуючих елементів бурових коронок для гірничодобувної промисловості, виготовлення деталей апаратури у виробництві синтетичних алмазів тощо [5].

Основні властивості твердих сплавів:

– висока твердість – завдяки основному компоненту, карбиду вольфраму (WC), тверді сплави мають твердість на рівні 85–93 HRA (за шкалою Роквелла), що дозволяє їм працювати з найтвердішими матеріалами, такими як каміння та метали;

– міцність – завдяки додаванню кобальту або нікелю як зв'язуючої фази, сплави здатні витримувати високі ударні навантаження, не руйнуючись; це поєднання забезпечує баланс між твердістю і пластичністю;

– зносостійкість – твердосплавні матеріали мають надзвичайну стійкість до абразивного зносу, що робить їх ефективними в умовах інтенсивного контакту з твердими породами, металами чи іншими абразивними матеріалами;

– термічна стабільність – тверді сплави зберігають свої властивості за температури до 1000 °C і вище, що важливо для робіт, пов'язаних із високим тертям та нагріванням;

– стійкість до корозії – завдяки використанню зв'язуючих матеріалів, таких як нікель, деякі тверді сплави також стійкі до корозійного впливу агресивних середовищ.

Метою даного дослідження є розробка інноваційних рішень для підвищення ефективності ударно-обертального буріння через оптимізацію матеріалів та конструкції бурового інструменту. Вдосконаленні бурового інструменту дозволить підвищити до 50 % ефективність бурових робіт у процесі ударно-обертального буріння. Докладно описано всі етапи вдосконалення бурового інструменту, що буде корисним як для дослідників у області ударно-обертального буріння, так і для виробників такого інструменту.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В роботі використано комплексну методику досліджень:

- статистичні дослідження працездатності бурового інструменту;
- аналіз результатів досліджень щодо впливу вмісту кобальту на міцність під час згинання металокерамічного сплаву;
- аналіз результатів досліджень щодо впливу вмісту кобальту на твердість та зносостійкість металокерамічного сплаву.

Властивості твердих сплавів істотно залежать від складу (вміст кобальту та легуючих добавок), а також від розміру зерна карбідної фази. Тому прийнято класифікувати тверді сплави на нанорозмірні, ультрадисперсні, особливо дрібнозернисті, дрібнозернисті, середньозернисті, крупнозернисті та особливо крупнозернисті [6, 7].

Тверді сплави, за складом карбідних фаз, поділяються на три групи: вольфрамкові (ВК), титановольфрамкові (ТК) та титанотанталовольфрамкові (ТТК) [8]. Сплави з твердих сплавів групи ВК застосовують переважно для обробки різанням чавуну, неметалевих матеріалів, деяких видів сталей і жароміцних сплавів, оснащення волочильного інструменту, деяких гірничих інструментів для буріння порід, зубців врубкових машин, коронок обертального буріння. Сплави групи ТК загалом застосовують в умовах помірного ударного навантаження під час чорнового точіння чавунів високої твердості та жароміцних сплавів. Сплави групи ТТК як найбільш міцні та пластичні, але недостатньо тверді (багато кобальту) застосовують для оснащення штампового інструменту, що працює в умовах ударного навантаження [9, 10].

Структура твердих вольфрамкових сплавів складається з зерен карбіду вольфраму (WC), зцементованих кобальтом. У вольфрамкових твердих сплавах, що випускають промислово, міститься від 3 до 30 %¹ кобальту. Зі збільшенням вмісту кобальту в твердому сплаві збільшується його міцність, але знижується твердість, а також зносостійкість.

Області застосування твердих сплавів визначаються їхніми властивостями: твердістю, в'язкістю руйнування, міцністю втоми, пластичністю, міцністю на стиск і вигин [11].

За допомогою зміни вмісту кобальту в сплаві або розміру зерен карбіду вольфраму, можна в широких межах регулювати твердість, зносостійкість, міцність та тріщиностійкість, проте неможливо домогтися одночасного зростання всіх цих параметрів. Так, збільшення твердості можна досягти, як правило, ціною зниження ударної в'язкості та межі міцності.

Сплави з відносно низьким вмістом кобальту (менш міцні, але зносостійкі) застосовують в умовах безударних навантажень. У процесі роботи інструменту в умовах ударних навантажень користуються більш міцними твердими сплавами з підвищеним вмістом кобальту і великим розміром карбідного зерна, які разом з тим мають меншу зносостійкість [12].

Тому для гірських робіт (руйнування порід) використовують виключно сплави групи ВК через унікальні поєднання твердості/зносостійкості та міцності (тріщиностійкості) [13–15].

Працездатність інструменту, з одного боку, визначається його міцністю, з другого – зносостійкістю [16, 17]. Наприклад, під час обробки металів різанням твердий сплав, з якого виготовлено інструмент, повинен мати високу твердість і термічну стійкість, що дозволить обробляти матеріали на більш

¹ Тут і далі вміст елементів приведено в % (за масою).

високих швидкостях подачі та з більшим навантаженням. Такі властивості мають нанокристалічні, ультрадисперсні та субмікронні тверді сплави.

Для більш грубої роботи, наприклад, для руйнування дорожніх покриттів використовують крупнозернисті та особливо крупнозернисті тверді сплави [18, 19], наприклад, сплави WC–Co з 7–9 % Co та розміром зерна карбідної фази понад 4 мкм; для бетонних покриттів – сплави з 11–12 % WC-фази, з розміром зерна – 8–10 мкм. Такий поділ сплавів по групах залежно від властивостей дорожнього покриття, що руйнується, обумовлено характером навантажень, що діє на різальний інструмент (від великих пікових значень навантажень до абразивного зносу з невеликими навантаженнями). У процесі руйнування асфальтових покриттів до сплавів висувують вимоги високих значень межі міцності на стиск, а високий вміст кобальту і карбідні зерна великого розміру забезпечує хорошу пластичність.

Під час розвідки та видобутку корисних копалин, будівництві тунелів та гідроспоруд, бурінні нафтових та газових свердловин, видобутку мінералів руйнування гірських порід проводять переважно твердосплавним інструментом [20–22]. Умови роботи бурових коронок дуже складні через різну твердість порід та різні схеми руху інструменту [23]. Найбільш поширеними на етапі розвитку техніки є такі способи: обертальний, ударно-поворотний; ударно-обертальний; обертально-ударний. Для оснащення бурового та гірничорізального інструменту застосовують тверді сплави групи ВК. У табл. 1 наведено склад та фізико-механічні властивості твердих сплавів для оснащення гірничого інструменту.

Таблиця 1. Сплави для гірничого інструменту

Марка сплавів	Вміст основних компонентів, %		Фізико-механічні властивості		
	WC	Co	Межа міцності на вигин, МПа	Щільність, г/см ³	HRA
ВК6	94	6	1500	14,6–15,0	85,9
ВК6-В	94	6	1550	14,6–15,0	87,5
ВК4-В	96	4	1400	14,9–15,2	88,0
ВК8	92	8	1600	14,4–14,8	87,5
ВК8-ВК	92	8	1750	14,5–14,8	87,5
ВК9-В	91	9	1750	14,4–14,7	86,5
ВК11-В	89	11	1800	14,1–14,4	87,0
ВК15	85	15	1800	13,9–14,1	86,0

Найбільш ефективними марками для оснащення гірничого інструменту є сплави групи ВК-КС, міцність на вигин яких вища, ніж у твердих сплавів WC–Co.

За наведеними вище даними можна сказати, що дрібнозернисті сплави не підходять для робіт з руйнування гірських порід, де спостерігаються високі ударні, стискаючі та згинальні навантаження.

Відомо, що ударна в'язкість і твердість, які є основними параметрами, що визначають характеристики твердих сплавів, змінюються монотонно у разі зміни вмісту Co і середнього розміру зерна WC (рис. 1).

Розглянемо вплив цих факторів.

Вміст кобальту (Co):

– твердість – зі зменшенням вмісту Co твердість збільшується; це пов'язано з тим, що знижується кількість пластичної зв'язувальної фази, а об'ємна частка твердих зерен WC стає вищою;

– ударна в'язкість – зі збільшенням вмісту Co ударна в'язкість зростає; більша кількість пластичної зв'язувальної фази забезпечує кращу здатність до поглинання енергії ударів.

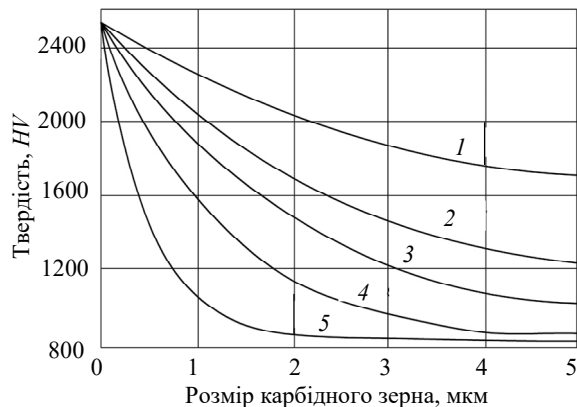


Рис. 1. Залежність твердості сплаву від розміру зерен карбіду вольфраму: 0 (1), 5 (2), 10 (3), 20 (4), 40 (5) % Co .

Середній розмір зерен WC :

– твердість – зі зменшенням середнього розміру зерен WC твердість сплаву збільшується завдяки ефекту подрібнення зерен (зміцнення за рахунок меж зерен);

– ударна в'язкість – зі збільшенням розміру зерен WC ударна в'язкість сплаву зростає, оскільки крупніші зерна сприяють зменшенню кількості меж зерен, які є потенційними точками зародження тріщин.

Загальна тенденція:

– для оптимального поєднання твердості та ударної в'язкості важливо знайти баланс між вмістом Co та розміром зерен WC ;

– тверді сплави з меншим вмістом Co і дрібними зернами WC підходять для умов високого зношування;

– тверді сплави з більшим вмістом Co і більшими зернами WC краще витримують ударні навантаження.

Ці взаємозв'язки використовують для проектування твердих сплавів з характеристиками, які відповідають певним експлуатаційним вимогам.

Ударна в'язкість збільшується, а твердість зменшується зі збільшенням вмісту кобальту, так і середнього розміру зерен WC . За винятком деяких особливих випадків, ударну в'язкість (тріщиностійкість) можна збільшити тільки за рахунок зменшення твердості, отже, і зносостійкості.

У табл. 2 і 3 показано стандартні марки крупнозернистих твердих сплавів для гірничодобувної промисловості та будівельних робіт виробництва провідних зарубіжних фірм ("Sandvik", Швеція та "E6", Німеччина).

Залежність міцності на стиск від вмісту кобальту у твердих сплавах WC-Co з розміром зерна WC від 1,4 до 5,3 мкм має максимум за вмісту 6 % Co . Незважаючи на той факт, що максимальну міцність на стиск можна досягти за середнього розміру зерен WC від 1,4 до 1,7 мкм, міцність на стиск практично не знижується у разі зменшення середнього розміру зерна WC .

Тверді крупнозернисті сплави для перфтораторного буріння повинні мати оптимальне поєднання межі міцності на стиск, тріщиностійкості і твердості, досягне за вмісту Со, що дорівнює 6 %, та за середнього розміру зерна WC 1,4–1,9 мкм.

Таблиця 2. Властивості бурових твердих сплавів фірми “Sandvik” (Швеція)

Марка сплаву	Склад, %		Розмір зерна, мкм	Щільність, г/см ³	Твердість, HRA	Межа міцності на вигин, МПа
	Со	WC				
CB15	6	94	1,6	14,9	91,5	2200
CB17	6	94	2,5	14,9	90,5	2300
CB13	8	92	3,5	14,7	88,9	2550
90B	9	91	3,0	14,6	88,9	2600
CB05	9,5	90,5	3,5	14,5	88,3	2700
CB12	11	89	4,1	14,4	87,1	2800
CB08	15	85	3,7	14,0	86,0	2900

Таблиця 3. Властивості твердих бурових сплавів фірми E6 (Німеччина)

Марка сплаву	Склад, %		Твердість, HRA	Межа міцності на згин, МПа
	Со	WC		
T6	6	94	90,6	2400
B20/H8	8	92	88,7	2500
BH9/H9	9	91	88,7	2600
B25SN	9,5	90,5	88,5	2680
B25/G10	10	90	88,2	2800
B30/J11	11	89	87,7	2900
B40/G15	15	85	86,5	3000

Недоліком бурового інструменту ударної дії для буріння з підвищеною енергією удару є передчасний вихід з ладу твердосплавних вставок.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

З метою підвищення ефективності бурових робіт під час перфтораторного буріння вибухових свердловин на кар’єрах на кафедрі Нафтогазової інженерії та буріння Національного технічного університету “Дніпровська політехніка” було розроблено удосконалену конструкцію бурової коронки за допомогою використання вдосконаленої різальної вставки з металокерамічного сплаву спеціальної конструкції.

На рис. 2 представлено бурову коронку з різальними вставками з металокерамічного сплаву. На рис. 3 зображено різальну вставку спеціальної конструкції з металокерамічного сплаву,

Бурова коронка з різальними вставками включає хвостовик та бурову головку, яка розташована на передньому кінці хвостовика. На буровій головці розташовані різальні вставки спеціальної конструкції з гідравлічними боковим та центральними 6 отворами. Центральні різальні вставки спеціальної конструкції розташовані перпендикулярно до осі бурової головки, в той час як периферійні різальні вставки спеціальної конструкції виконано під кутом α

відносно осі бурової головки. Таке розташування призводить до збільшення площі контакту з гірською породою.

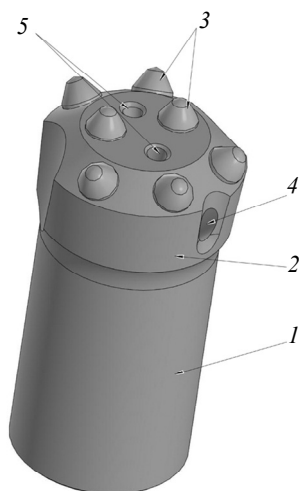


Рис. 2. Бурова коронка з різальними вставками з металокерамічного сплаву: 1 – хвостовик; 2 – бурова головка; 3 – центральні різальні вставки спеціальної конструкції; 4 – центральні різальні вставки спеціальної конструкції; 5 – гідравлічний боковий отвір; 6 – центральні гідравлічні отвори.

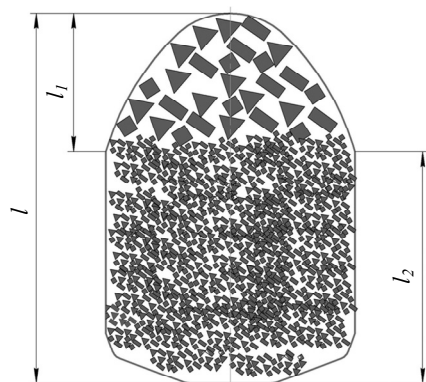


Рис. 3. Різальна вставка спеціальної конструкції з металокерамічного сплаву: l – загальна довжина різальної вставки спеціальної конструкції; l_1 – довжина робочої частини різальної вставки; l_2 – довжина циліндричної інсталяційної частини різальної вставки.

Найбільш поширений метод монтажу твердосплавної вставки в корпус коронки – за допомогою преса із зусиллям, яке відповідає розміру та матеріалу коронки. Зазвичай використовується механічний, гідравлічний або пневматичний прес.

Для уникнення пошкоджень твердосплавних вставок зусилля прикладається рівномірно через спеціальні вставки або оправки.

Для коронок важливий баланс між твердістю твердосплавних елементів і пластичністю основи, щоб витримувати динамічні навантаження під час буріння.

Твердосплавні вставки розташовують так, щоб забезпечувати рівномірний знос і максимальну ефективність буріння.

Цей процес вимагає високої точності, оскільки помилки під час запресування можуть призвести до швидкого виходу коронки з ладу.

Різальні вставки спеціальної конструкції виконано з металокерамічного сплаву, де загальна довжина l різальної вставки спеціальної конструкції поділена на дві частини. Робоча частина різальної вставки має балістичну форму та відрізняється від циліндричної інсталяційної частини за складом та фракційністю компонентів металокерамічного сплаву, що підвищує зносостійкість різальної вставки спеціальної конструкції.

Бурову коронку з різальними вставками встановлюють на бурову трубу, яка приєднана до бурової установки. Під час роботи, бурова коронка з різальними вставками обертається та врізається своїми вставками робочою частиною різальної вставки у гірську породу з високою твердістю.

Завдяки тому, що різальну вставку спеціальної конструкції виконано з металокерамічного сплаву з різним складом та фракційністю компонентів, який досягає найвищого значення межі міцності на вигин, вона спроможна сприймати більше навантаження до 50 %.

Отже, запропонована бурова коронка з різальними вставками приводить до збільшення площі контакту з гірською породою (за рахунок збільшеної глибини входу в породу під дією підвищеного навантаження), підвищує зносостійкість, та у результаті прискорює швидкість буріння, що в свою чергу приводить до зменшення витрат.

Достовірну та повну інформацію про стан матеріалу спеченого виробу можна отримати після дослідження його мікроструктури.

Мікроструктуру твердих сплавів, як і інших металів, досліджують за допомогою інвертованих, тобто звернених, перевернутих металографічних мікроскопів, в яких зразок поміщають на столик мікроскопа стороною, що досліджують вниз і розглядають його знизу. Цим усувають неточності установки зразка та покращують фокусування оптичної системи мікроскопа. Перед початком дослідження зразок готують до перегляду – ретельно шліфують і полірують поверхню, що досліджують, протрують спеціальними реактивами для виявлення окремих структурних складових, які під час травлення набувають специфічного, тільки даним складовим властиве, забарвлення і тональності.

Дослідження мікроструктури дозволяє визначити кількість, форму і розподіл твердих фаз і порожнин (пор), розподіл зв'язки та однорідність структури – всі ці параметри істотно впливають на службові характеристики матеріалу: міцність, твердість, опір зношування, електроопір, проникність (важливо для фільтрів) і таке інше.

Під час дослідження мікроструктуру сплаву можна з високим ступенем достовірності оцінити такі характеристики твердого сплаву, як твердість, межа міцності на поперечний згин і, що особливо важливо, – повзучість за високих температур, модуль Юнга, ударну в'язкість і опір зношування, які неможливо вимірювати у твердих сплавах через їхню низьку пластичність. Результати дослідження мікроструктури твердого сплаву наведено на рис. 4, 5.

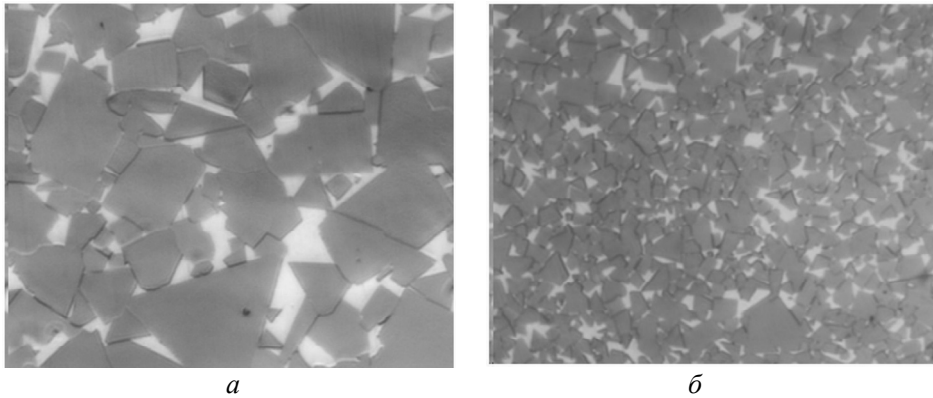


Рис. 4. Мікроструктура зразка твердого сплаву із зернами 6 (а) і 2 (б) мкм; $\times 1600$.

Дослідження мікроструктури твердих сплавів є ключовим етапом для розуміння їхніх властивостей і прогнозування поведінки в експлуатації. Для цього використовують сучасні методи аналізу, які дозволяють дослідити склад, розподіл фаз, дефекти структури, а також характеристики зерен та меж зерен. Основні аспекти дослідження мікроструктури:

- виявлення фазового складу: аналіз матричної фази (кобальтова зв'язка) і карбідів (WC, TiC, TaC тощо);
- оцінка розподілу зерен WC: розмір і форма зерен впливають на твердість і зносостійкість;

- аналіз меж зерен: межі між зернами WC і матрицею Co визначають ударну в'язкість і тріщиностійкість;
- виявлення дефектів: тріщини, пори, сегрегації або інші дефекти, що можуть вплинути на механічні властивості.

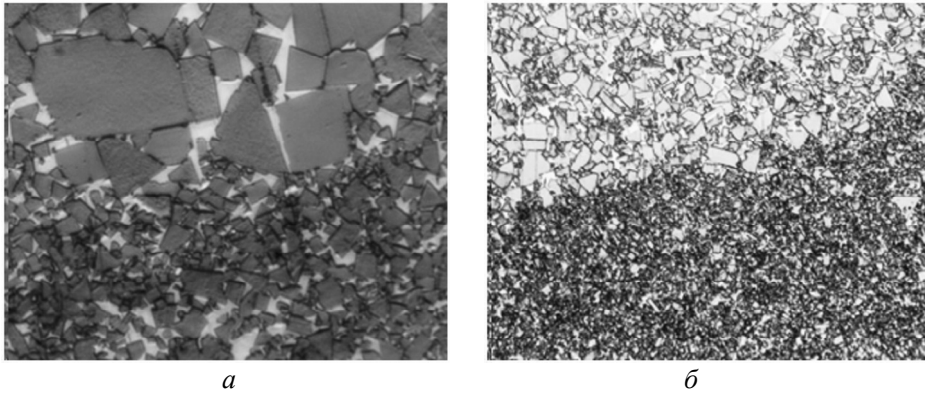


Рис. 5. Мікроструктура зразка дуального твердого сплаву, що складається з двох частин із зернами 6 та 2 мкм; $\times 1600$ (а) і $\times 320$ (б).

На першому етапі досліджень мікроструктури проводили дослідження двох зразків твердого сплаву з зерном 6 та 2 мкм (рис. 4). Результати аналізу мікроструктури твердих сплавів після спікання показали рівномірність розподілу зерен карбіду вольфраму у кобальті та відсутність пористості, що свідчить про правильно підібрану рецептуру твердого сплаву та режим спікання у вакуумно-компресійній печі.

Другим етапом дослідження мікроструктури твердого сплаву було визначення чіткої межі між фазами твердого сплаву з різним розміром зерна карбіду вольфраму в одній різальній вставці.

Результати досліджень мікроструктури твердого сплаву наведено на рис. 5. Аналіз мікроструктури твердого сплаву показав, що було отримано різальну вставку з подвійною зерновою структурою. Границя між карбідами вольфраму з різним розміром зерна чітка та виражена, пори та тріщини відсутні.

Однорідний розподіл зерен забезпечує рівномірний розподіл напружень, що покращує ударну в'язкість і тріщиностійкість.

Дрібні зерна (2 мкм) підвищують твердість і зносостійкість через ефект подрібнення зерен, великі зерна (6 мкм) збільшують ударну в'язкість, але знижують твердість за однакового вмісту кобальту.

Розроблені різальні вставки з двошаровою конструкцією твердого сплаву на основі карбіду вольфраму та кобальту забезпечують оптимальний баланс між зносостійкістю та ударною міцністю. Верхній шар має максимальну твердість завдяки зменшенню вмісту кобальту та максимальну зносостійкість завдяки використанню крупного зерна, тоді як нижні шари мають більшу ударну в'язкість і тріщиностійкість – міцні на удар. Завдяки таким характеристикам розроблені різальні вставки підвищують продуктивність коронок і зменшують частоту заміни.

ВИСНОВКИ

Завдяки використанню запропонованої нової конструкції різальних вставок з металокерамічного сплаву та використанню бурового обладнання з більшою енергією удару підвищено швидкість буріння до 50 %.

За допомогою мікроструктурного аналізу підтверджено можливість спікання твердого сплаву з подвійною зерновою структурою та чіткою границею між ними.

Під час обґрунтування складу твердосплавних вставок для армування породоруйнівного інструменту, а саме: вмісту кобальту та розміру зерна карбіду вольфраму, слід враховувати наступні характеристики: межу міцності матеріалу твердосплавної вставки на вигин та зносостійкість твердосплавної вставки.

Вставки з двошаровою конструкцією твердого сплаву на основі карбіду вольфраму та кобальту забезпечать оптимальний баланс між зносостійкістю та ударною міцністю, що підвищує продуктивність коронок і зменшують частоту їхньої заміни.

Дослідження твердосплавних вставок для бурових коронок треба активно продовжувати через необхідність підвищення продуктивності, зниження витрат і адаптацію до нових викликів у гірничій, нафтовій і будівельній галузях. Основні напрямки мають бути наступними: розробка композитів із карбіду вольфраму з додаванням інших металів (танталу, ніобію) для підвищення стійкості до зносу та ударів; використання наночастинок для покращення структури матеріалу, що забезпечує кращу термо- та зносостійкість; пошук альтернативних зв'язуючих матеріалів замість кобальту через його високу вартість і токсичність.

ФІНАНСУВАННЯ

Робота була підтримана постійним інституційним фінансуванням. Жодних додаткових грантів на проведення чи керівництво цим дослідженням отримано не було.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори цієї роботи заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Ye. A. Koroviaka, S. O. Shypunov

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Improving drilling technology in percussive rotary drilling

A two-layer design of a cutting insert for a drilling tool using WC–Co carbide with different cobalt content and tungsten carbide grain size with a clear boundary between zones of different grain size was developed, which increased the wear resistance and impact strength of the tool and increased the rate of percussion-rotary drilling of hard rocks by up to 50 %. The upper layer of the cutting insert consists of a coarse-grained structure (6 μm) with high wear resistance, and the lower layer is a fine-grained structure (2 μm) with increased impact strength. The results of the study can be used in the mining, oil and gas, and construction industries to improve drilling efficiency.

Keywords: perforator, drill bit, cutting insert, metal-ceramic alloy, drilling rig.

1. Pavlychenko A.V., Ihnatov A.O., Koroviaka Y.A., Ratov B.T., Zakenov S.T. Problematics of the issues concerning development of energy-saving and environmentally efficient technologies of well construction. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022. Vol. 1049, art. 012031.
2. Koroviaka Ye.A., Ihnatov A.O., Pavlychenko A.V., Valouch Karel, Rastsvietaiev V.O., Matyash O.V., Mekshun M.R., Shypunov S.O. Studying the performance features of drilling rock destruction and technological tools. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 6. P. 466–476.
3. He X. Reviewing the advancements in offshore drilling technologies in the USA and their global impact. *WJARR.* 2023. Vol. 21, no. 1. P. 2242–2249.
4. Kim T., Lee H., Park J. Energy optimization in percussive drilling: A simulation approach. *J. Drill. Sci. Technol.* 2023. Vol. 45, no. 3. P. 267–276.

5. Ratov B.T., Chudyk I.I., Fedorov B.V., Sudakov A.K., Borash B.R. Results of production tests of an experimental diamond crown during exploratory drilling in Kazakhstan. *SOCAR Proc.* 2023. No. 2. P. 25–31.
6. Teodoriu C., Bello O. An outlook of drilling technologies and innovations: Present status and future trends. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 15, art. 4499.
7. Chen C., Huang B., Liu Z., Li Y., Zou D., Liu T., Chang Y., Chen L. Additive manufacturing of WC–Co cemented carbides: Process, microstructure, and mechanical properties. *Add. Manufact.* 2023. Vol. 63, art. 103410.
8. Jiann S., David W. Advanced percussive drilling technology for geothermal exploration and development DE-FOA-EE0005502. *GRC Trans.* 2017. Vol. 41. P. 100–125.
9. Li Z., & Han Y. The rock-breaking mechanism of rotary percussive cutting under high-frequency impact. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2023. Vol. 155, art. 104789.
10. Lao K., Bruno M., Diessl J., Ramos J., Oliver N. The use of advanced percussion drilling to improve subsurface permeability for enhanced geothermal systems. *Transactions*. 2019. Vol. 43. P. 58–75.
11. Ju P., Tian D. Improving breaking efficiency of hard rock: Research on the mechanism of impact-shear rock breaking technology. *Energy Explor. Exploit.* 2025. Vol. 43, no. 1. P. 451–470.
12. Kresse T., Meinhard D., Bernthaler T., Schneide, G. Hardness of WC–Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modeling. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2018. Vol. 75. P. 287–293.
13. Powell S., Rodgers T., Huang L. Rate of penetration (ROP) optimization using percussion rotary drilling. *Int. J. Drill. Eng.* 2021. Vol. 58, no. 3. P. 245–259.
14. Ratov B., Fedorov B., Sudakov A., Taibergenova I., Kozbakarova S. Specific features of drilling mode with extendable working elements. *E3S Web Conf.* 2021. Vol. 230, art. 1013.
15. Davydenko A.N., Kamyshtsky A.F., Sudakov A.K. Innovative technology for preparing washing liquid in the course of drilling. *Sci. Innov.* 2015. Vol. 11, no. 5. P. 5–13.
16. Ihnatov A.O., Koroviaka Ye.A., Haddad J., Tershak B.A., Kaliuzhna T.M., Yavorska V.V. Experimental and theoretical studies on the operating parameters of hydromechanical drilling. *Nauk. Visn. Nat. Hirn. Univ.* 2022. Vol. 1. P. 20–27.
17. Ihnatov A., Haddad J.S., Koroviaka Ye., Aziukovskiy O., Rastsvietaiev V., Dmytruk O. Study of rational regime and technological parameters of the hydromechanical drilling method. *Arch. Min. Sci.* 2023. Vol. 68, no. 2. P. 285–299.
18. Deng T., Yang Q., Huang Y., Li M., Chen L., Tang, Y., Zhang L., Xu G. Effect of Ni addition on the microstructure and mechanical properties of coarse-grained cemented carbides using the dissolution method with WO_3 as the raw material. *Ceram. Int.* 2025. Vol. 3. P. 285–299.
19. Pashchenko O., Ratov B., Khomenko V., Gusmanova A., Omirzakova E. Methodology for optimizing drill bit performance. *SGEM*. 2024. Vol. 2024, is. 1.1. P. 623–631.
20. Kang H., Park J.Y., Cho J.W., Jang J.S., Kim K.W., Lee J.W. Optimal button arrangement of a percussion drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency. *Proc. Inst. Mech. Eng. C: J. Mech. Eng. Sci.* 2018. Vol. 232, no. 16. P. 2887–2898.
21. Ratov B.T., Mechnik V.A., Gevorkyan E.S., Bondarenko N.A., Kolodnitskiy V.M., Akhmetova N.S., Korostyshevskiy D.L., Bayamirova R.U. Investigating the wear resistance of C_{diamond}–(WC–Co)–ZrO₂ composite impregnated crowns in granite drilling. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 4. P. 314–321.
22. Ratov B.T., Mechnik V.A., Bondarenko N.A., Kolodnitskiy V.M., Gevorkyan E.S., Nerubaskiy V.P., Gusmanova A.G., Fedorov B.V., Kaldibaev N.A., Arshidinova M.T., Kulych V.G. Features structure of the C_{diamond}–(WC–Co)–ZrO₂ composite fracture surface as a result of impact loading. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 5. P. 348–359.
23. Abbas R.K. A review on the wear of oil drill bits (conventional and the state of the art approaches for wear reduction and quantification). *Eng. Fail. Anal.* 2018. Vol. 90. P. 554–584.

Надійшла до редакції 07.04.25

Після доопрацювання 23.04.25

Прийнята до опублікування 05.05.25