УДК: 622.21; https://doi.org/10.37878/2708-0080/2025-2.03
https://orcid.org/0000-0002-5346-3004
https://orcid.org/0000-0002-1885-0367
https://orcid.org/0000-0002-3163-153X
https://orcid.org/0000-0003-4707-3322
https://orcid.org/0000-0003-3997-8324
https://orcid.org/0000-0003-1721-119X

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

А.А СЕЙДАЛИЕВ[1],
кандидат технических наук,
ассоциированный профессор,
askar.seidaliyev@yu.edu.kz

А.Б. КАЛЖАНОВА[1],
докторант PhD,
kalzanovaasemgul@gmail.com

А.Г. ГУСМАНОВА[1],
кандидат технических наук,
профессор,,
aigul.gusmanova@yu.edu.kz

Б.Т. РАТОВ[2],
доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой
«Геофизика и сейсмология»,
b.ratov@satbayev.university

А.Е. КУТТЫБАЕВ[2], кандидат технических наук, профессор,
a.kuttybayev@satbayev.university
М.Д. САРБОПЕЕВА[1], PhD, ассоц. профессор, *manshuk.sarbopeyeva@yu.edu.kz*
З.Г. УТЕПОВ[1], докторант PhD, *otepzaman@gmail.com*

[1]YESSENOV UNIVERSITY,
Республика Казахстан, 130000, г. Актау, 32 мкр.

[2]SATBAYEV UNIVERSITY,
Қазақстан Республикасы, 050013, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22

В данной работе исследуются композиционные алмазосодержащие материалы (КАМ), которые основываются на твердосплавных матрицах, включающих микропорошки карбида вольфрама (WC), кобальта (Co) и добавки микропорошка CrB2 в малых количествах. Эти материалы предназначены для создания инструментов, ориентированных на эффективное разрушение твердых пород, что важно для различных геологических и горных работ. Основной целью исследования является разработка и создание КАМ с улучшенными механическими и эксплуатационными характеристиками, такими как твердость, трещиностойкость, прочность на сжатие и изгиб, а также износостойкость и производительность. Эти характеристики необходимы для повышения эффективности породоразрушающего инструмента.

Для проведения оценочных испытаний использовались микромеханические методы с применением нанотвердомера Nano Indenter G200 и микротвердомера «FALCON 500». В результате экспериментов было установлено, что добавление 4% CrB2 значительно повышает вязкость разрушения материала и способствует улучшению микроструктуры матрицы, что, в свою очередь, приводит к росту механических свойств. Полученные результаты имеют важное значение для создания более эффективных и долговечных инструментов для бурения нефтяных и газовых скважин. Экономическая значимость работы заключается в повышении производительности бурения в твердых породах, что способствует ускорению ввода в эксплуатацию новых месторождений. Также ожидается, что в будущем будет разработан ряд новых типов буровых долот, которые будут использовать высококачественное алмазное сырье, что обеспечит дальнейшее улучшение эффективности горных и буровых работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *алмаз, композит, карбид вольфрама, кобальт, диборид хрома, концентрация, структура, свойства, твердость, вязкость разрушения.*

БҰРҒЫЛАУ ҚҰРАЛЫНЫҢ ПАЙДАЛАНУ ҚАСИЕТТЕРІН ЖОҒАРЛАТУ ҮШІН ҚҰРАМЫНДА АЛМАЗ ЭЛЕМЕНТТЕРІ БАР ҚОСПАЛАРДЫ ҚОСУ

А.А. СЕЙДАЛИЕВ[1], техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор,
askar.seidaliyev@yu.edu.kz
А.Б. КАЛЖАНОВА[1], докторант PhD, *kalzanovaasemgul@gmail.com*
А.Г. ГУСМАНОВА[1], техника ғылымдарының кандидаты, профессор, *aigul.gusmanova@yu.edu.kz*
Б.Т. РАТОВ[2], техника ғылымдарының докторы, профессор, «Геофизика және сейсмология» кафедрасының меңгерушісі, *b.ratov@satbayev.university*
А.Е. КУТТЫБАЕВ[2], техника ғылымдарының кандидаты, профессор,
a.kuttybayev@satbayev.university
М.Д. САРБОПЕЕВА[1], PhD, қауымдастырылған профессор, *manshuk.sarbopeyeva@yu.edu.kz*
З.Г. УТЕПОВ[1], докторант, *otepzaman@gmail.com*

[1]YESSENOV UNIVERSITY,
Қазақстан Республикасы, 130000, Ақтау қ., 32 ш/а.

[2]SATBAYEV UNIVERSITY,
Қазақстан Республикасы, 050013, Алматы қ., Сәтбаевк-сі, 22

Бұл жұмысда құрамында вольфрам карбиді (WC), кобальт (Co) микроұнтақтары және шағын мөлшердегі CrB2 микроұнтақ қоспалары бар карбидті матрицаларға негізделген композитті алмас бар материалдарды (АБМ) зерттейді. Бұл материалдар әртүрлі геологиялық және тау-кен жұмыстарын жүргізу үшін маңызды болып табылатын қатты жыныстарды тиімді жоюға бағытталған құралдарды жасауға арналған. Зерттеудің негізгі мақсаты қаттылық, жарықшақтарға төзімділік, қысу және иілу беріктігі, сондай-ақ тозуға төзімділік пен өнімділік сияқты жақсартылған механикалық және өнімділік сипаттамалары бар КАМ әзірлеу және жасау болып табылады. Бұл сипаттамалар тас кесетін құралдардың тиімділігін арттыру үшін қажет.

Бағалау сынақтарын жүргізу үшін микромеханикалық әдістер Nano Indenter G200 наноқаттылықты сынаушы және FALCON 500 микроқаттылық сынағы қолданылды. Тәжірибелердің нәтижесінде 4% CrB2 қосу материалдың сынуға төзімділігін айтарлықтай арттыратыны және матрицаның микроқұрылымын жақсартуға көмектесетіні, бұл өз кезегінде механикалық қасиеттердің жоғарылауына әкелетіні анықталды. Алынған нәтижелер мұнай және газ ұңғымаларын бұрғылау үшін тиімдірек және берік құралдарды жасау үшін маңызды. Жұмыстың экономикалық маңыздылығы жаңа кен орындарын іске қосуды жеделдетуге көмектесетін қатты жыныстардағы бұрғылаудың өнімділігін арттыруда. Сондай-ақ келешекте тау-кен және бұрғылау жұмыстарының тиімділігін одан әрі арттыруға мүмкіндік беретін жоғары сапалы өрескел алмастарды пайдаланатын бұрғылау қашауларының бірқатар жаңа түрлері әзірленеді деп күтілуде.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *алмаз, композиттік, вольфрам карбиді, кобальт, хром дибориді, концентрациясы, құрылымы, қасиеттері, қаттылығы, сынуға төзімділігі.*

OPTIMIZATION OF THE OPERATIONAL PROPERTIES OF DRILLING EQUIPMENT TOOLS WITH DIAMOND-CONTAINING ELEMENTS

A.A. SEIDALIYEV[1], candidate of Technical Sciences, associate professor *askar.seidaliyev@yu.edu.kz*
A.B. KALZHANOVA[1], student PhD, *kalzanovaasemgul@gmail.com*
A.G. GUSMANOVA[1], candidate of technical sciences, professor, *aigul.gusmanova@yu.edu.kz*
B.T. RATOV[2], doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Geophysics and seis-mology Department, *b.ratov@satbayev.university*
A.E. KUTTYBAEV[2], candidate of technical sciences, professor, *a.kuttybayev@satbayev.university*
M.D. SARBOPEYEVA[1], PhD, associate professor, *manshuk.sarbopeyeva@yu.edu.kz*
Z.G. UTEPOV[1], student PhD, *otepzaman@gmail.com*

[1]YESSENOV UNIVERSITY,
Republic of Kazakhstan, 130000, Aktau, 32 md.

[2]SATBAYEV UNIVERSITY,
Republic of Kazakhstan, 050043, Almaty, Satpayev st. 22

This paper studies composite diamond-containing materials (CDM) based on carbide matrices containing tungsten carbide (WC), cobalt (Co) micropowders and CrB2 micropowder additives in small quantities. These materials are intended for creating tools aimed at efficient destruction of hard rocks, which is important for various geological and mining operations. The main objective of the

study is to develop and create CDM with improved mechanical and operational characteristics, such as hardness, crack resistance, compressive and bending strength, as well as wear resistance and productivity. These characteristics are necessary to increase the efficiency of rock-destroying tools.

Micromechanical methods using a Nano Indenter G200 nanohardness tester and a FALCON 500 microhardness tester were used to conduct evaluation tests. The experiments showed that adding 4% CrB2 significantly increases the fracture toughness of the material and improves the matrix microstructure, which in turn leads to an increase in mechanical properties. The results obtained are important for creating more efficient and durable tools for drilling oil and gas wells. The economic significance of the work lies in increasing the productivity of drilling in hard rocks, which helps to accelerate the commissioning of new fields. It is also expected that in the future a number of new types of drill bits will be developed that will use high-quality diamond raw materials, which will further improve the efficiency of mining and drilling operations.

KEYWORDS: *diamond, composite, tungsten carbide, cobalt, chromium diboride, concen-tration, structure, properties, hardness, fracture toughness.*

Введение. Объект исследования – композиционные алмазосодержащие материалы (КАМ) на основе твердосплавных матриц, содержащих микропорошки карбида вольфрама, кобальта и добавки микропорошка CrB_2 в малых количествах по отношению к основным компонентам, инструменты, разработанные на их основе с учетом особенностей разрушения твердых пород [1,2].

Цель работы – разработка высокоэффективных композиционных алмазосодержащих материалов на основе WC-Co-матриц с добавками CrB_2 с повышенными (твердость, трещиностойкость, прочность на сжатие и изгиб) и эксплуатационными (износостойкость, производительность) свойствами для породоразрушающего инструмента различного функционального назначения.

Методы при проведении работы: микромеханические (измерение твердости H и модуля упругости E) испытания проводили на нанотвердомере Nano Indenter G200 (Agilent Technologies, USA) трехгранным индентором Берковича при глубине индентирования 200 нм. Нанотвердость H и модуль упругости E находили из анализа кривой разгрузки индентора по методу Оливера и Фара. Точность измерения глубины отпечатка ±0.04 нм, нагрузки на индентор – ±20–24 мН. Для определения твердости по Виккерсу и визуализации отпечатков индентора, а также измерения длин радиальных трещин использовали микротвердомер «FALCON 500» (Innovates, Holland), оборудованного цифровым микроскопом.

Результаты работы и их новизна: установлено, что оценочные параметры сопротивления упругой H/E и пластической H3/E2 деформаций материала матриц 94%WC–6%Co спеченных образцов КАМ растут линейно с увеличением концентрации в их составе при незначительном уменьшении твердости H и модуля упругости E. При этом наибольшие значения H/E (0,056) и H3/E2 (0,088 ГПа) зафиксировано при концентрации 10 мас.% CrB_2. Добавление 4 % диборида хрома приводит к существенному увеличению вязкости разрушения (с 9 до 14,5 МПа м1/2) при незначительном снижении твердости (с 15,5 до 14,3 ГПа). Механизм улучшения механических свойств спеченных образцов КАМ заключается в том, что введение в их состав добавки 4 мас.% CrB_2 позволяет уменьшить интенсивность роста зерен WC, и как следствие, сформировать однородную мелкозернистую микроструктуру твердосплавной матрицы [3].

Область применения: создание высокоэффективного инструмента на основе разработанных новых видов композиционных алмазосодержащих материалов для бурения нефтяных и газовых скважин.

Экономическая эффективность или значимость работы заключается в повышении производительности бурения разведочных скважин в твердых породах и ускорении ввода в эксплуатацию новых месторождений.

Прогнозные предложения о развитии объекта исследования: в качестве прогноза следует ожидать разработку новых типов буровых долот, оснащенных высококачественным алмазным сырьем, полученным при выполнении настоящего работе.

Материалы и методы исследования.

Исследование влияния дисперсно-упрочняющей добавки диборида хрома (CrB_2) в количестве от 0 до 10 % (по массе) на твердость и трещиностойкость (вязкость разрушения) спеченных композиционных материалов WC–6 Co, которые используются как матрицы композиционных алмазосодержащих материалов буровых инструментов [4, 5].

Твердость и модуль упругости спеченных образцов.

Проведенными исследованиями установлено, что механические свойства спеченных образцов проявляют значительную чувствительность к наличию добавки CrB_2 в их составе. На *рис. 1* представлены результаты тестирования наноиндентированием образцов, а именно зависимости твердости *H* и модуля упругости *E* (измеренных при наноиндентировании трехгранным индентором Берковича) от концентрации диборида хрома в образцах 94 мас.%WC–6 мас.% Co [6].

Как следует из *рис. 1*, что твердость *H* (кривая 1) и модуль упругости *E* (кривая 2) спеченных образцов твердосплавной матрицы 94 мас.%WC–6 мас.%Co линейно уменьшаются по мере увеличения концентрации CrB_2. Так, с увеличением концен-

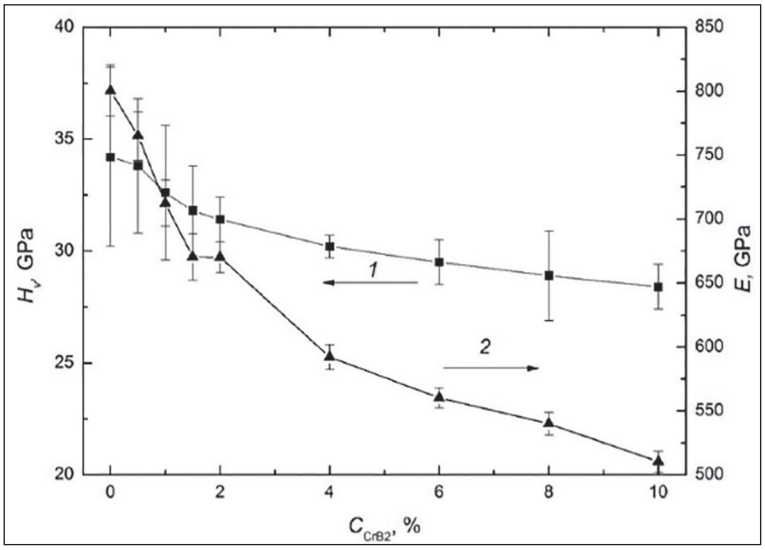

Рисунок 1 – **Зависимости нанотвердости H (кривая 1) и модуля упругости (кривая 2) спеченных образцов твердосплавной матрицы (94 мас.%WC–6 мас.% Co) от концентрации CrB_2**

трации CrB_2 от 0 до 10 мас.% в образце твердосплавной матрицы 94 мас.%WC–6 мас.%Co величины твердости и модуля упругости линейно уменьшается на ~17 % и ~35 % соответственно. Уменьшение твердости и модуля упругости при добавлении CrB_2 в состав образцов может быть вызвано следующими причинами. С одной стороны, введение в матрицу 94 мас.%WC–6 мас.%Co частиц диборида хрома, твердость которого немного ниже твердости карбида вольфрама, а модуль упругости (E ~ 215 ГПа) в 3,5 раза ниже (215 и 710 ГПа соответственно). С другой стороны, в силу существенного различия в температурах спекания компонентов повышение концентрации диборида хрома, температура спекания которого значительно выше используемой, по-видимому, вызывает снижение твердости и модуля упругости композита [7].

При исследовании параметров для определения сопротивления материала упругой H/E и пластической H^3/E^2 деформаций для спеченных образцов твердосплавных матриц КАМ, напротив, выявлено положительное влияние добавки диборида хрома [8]. На *рис. 2* представлены кривые зависимости H/E и H^3/E^2 для спеченных образцов твердосплавных матриц с различной концентрацией диборида хрома (C_{CrB2}). Как видно из *рис. 2*, концентрационные зависимости сопротивления упругой H/E и пластической H^3/E^2 деформаций имеют два характерных участка. На первом участке при $0 \leq_{CrB2} \leq 2$ мас.% наблюдается резкое увеличение H/E и H^3/E^2. На втором участке при $2 \leq_{CrB2} \leq 10$ мас.% наблюдается менее интенсивный рост параметров H/E и H^3/E^2, чем на первом участке.

Важно отметить, что в классической теории износа материалов твердость является главным свойством, определяющим их износостойкость [3, 9]. Эта теория хорошо выполняется для металлов и их сплавов, для которых износостойкость пропорциональна твердости. Однако для многих современных материалов, в том числе

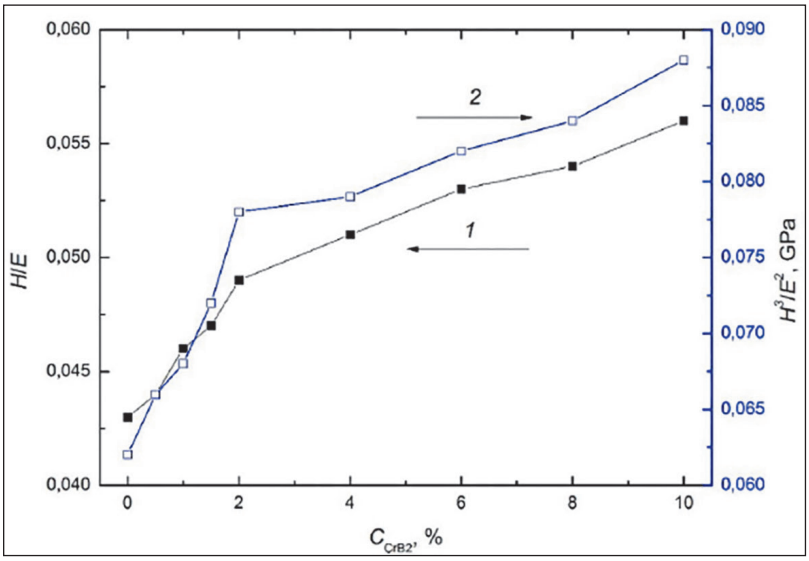

Рисунок 2 – **Зависимость параметров для определения сопротивления упругой *H/E* (кривая 1) и пластической H^3/E^2 (кривая 2) деформаций от концентрации CrB_2 для спеченных образцов 94 мас.%WC – 6 мас.%Co**

алмазосодержащих, было замечено, что их износостойкость пропорциональна H/E [3, 10]. Для оценки сопротивления материала пластической деформации применяют параметр H^3/E^2 [11,12]. Отсюда следует, что для повышения сопротивления материала упругой и пластической деформациям матрица КАМ должен обладать достаточно высокой твердостью при низком модуле упругости. Напомним, что для твердых сплавов 94wt.%WC–6wt.%Co, используемых для изготовления бурового инструмента, характерно большое значение модуля упругости [3, 13], поэтому они являются хрупкими, что неприемлемо для рассматриваемых КАМ.

Другими словами для повышения износостойкости не обязательно создавать материалы с очень высокой твердостью [14], важно также снизить при этом модуль упругости (что наблюдается уже при $C_{CrB2} \geq 1$ мас.%. см. *рис. 1*, кривая 2).

Таким образом, целенаправленное уменьшение твердости H и модуля упругости E твердосплавной матрицы повышает параметры H/E и H^3/E^2, что очень важно для разработанных образцов КАМ. Поскольку такие КАМ при обработке твердых и абразивных горных пород подвергаются значительным динамическим нагрузкам и температурам [15-17], которые могут вызвать необратимые пластические деформации и привести к их деградации и разрушению [18,19].

Результаты и обсуждение.

Микротвердость и вязкость разрушения. Действительно, выявлено уменьшение твердости, определенной при индентировании пирамидой Виккерса, спеченных композитов WC-6Co при повышении концентрации CrB_2. Влияние содержания CrB_2 на средние значения измеренной твердости (H) спеченных образцов WC-6Co и рассчитанный критический коэффициент трещиностойкости (вязкость разрушения) показаны на *рис. 3*. Исходный композит WC-6Co (образец 1) демонстрирует наибольшую твердость 15,5 ГПа (*рис. 3*, а, кривая 1). Наличие CrB_2 в составе композитов приводит к уменьшению их твердости до 13,5 ГПа при максимальной его концентрации. Полученные результаты согласуются с данными для спеченных образцов твердых сплавов WC–6Co [19].

В противоположность этому, введение CrB_2 в состав композита WC-6Co при концентрациях $\leq 4\%$ положительно отражается на вязкости разрушения.

При этом на фоне незначительного (~10%) снижения H наблюдается существенное (до 62 %) увеличение вязкости разрушения K_{IC} композита (см. *рис. 3*, а, кривая 2). Так, при $C_{CrB2} = 4$ % (образец 5) $K_{IC} = 14{,}5$ МПа · м$^{1/2}$, в то время как при $C_{CrB2} = 0$ % (образец 1) $K_{IC} = 9{,}0$ МПа · м$^{1/2}$.

Дальнейшее увеличение содержания CrB_2 ($C_{CrB2} = 6\%$) в композите WC-6Co (образец 6) вызывает незначительное уменьшение вязкости разрушения. При дальнейшем увеличении содержания CrB_2 (до 10%) в композите WC-6Co наблюдается дальнейшее постепенное уменьшение вязкости разрушения. При этом материал в окрестностях отпечатка индентора начинает разрушаться и трещины распространяются хаотично. В качестве примера на *рис. 3*, б и в представлены микрофотографии отпечатков пирамиды Виккерса, сформированных в композитах 1 и 5 с содержанием CrB_2 0 % и 4 % соответственно. Видно (см. *рис. 3*, б), что в композите 1 на внутренней области отпечатка пирамиды Виккерса, так и вокруг него наблюдается много трещин значительной величины. Появление подобного семейства трещин в образце 1

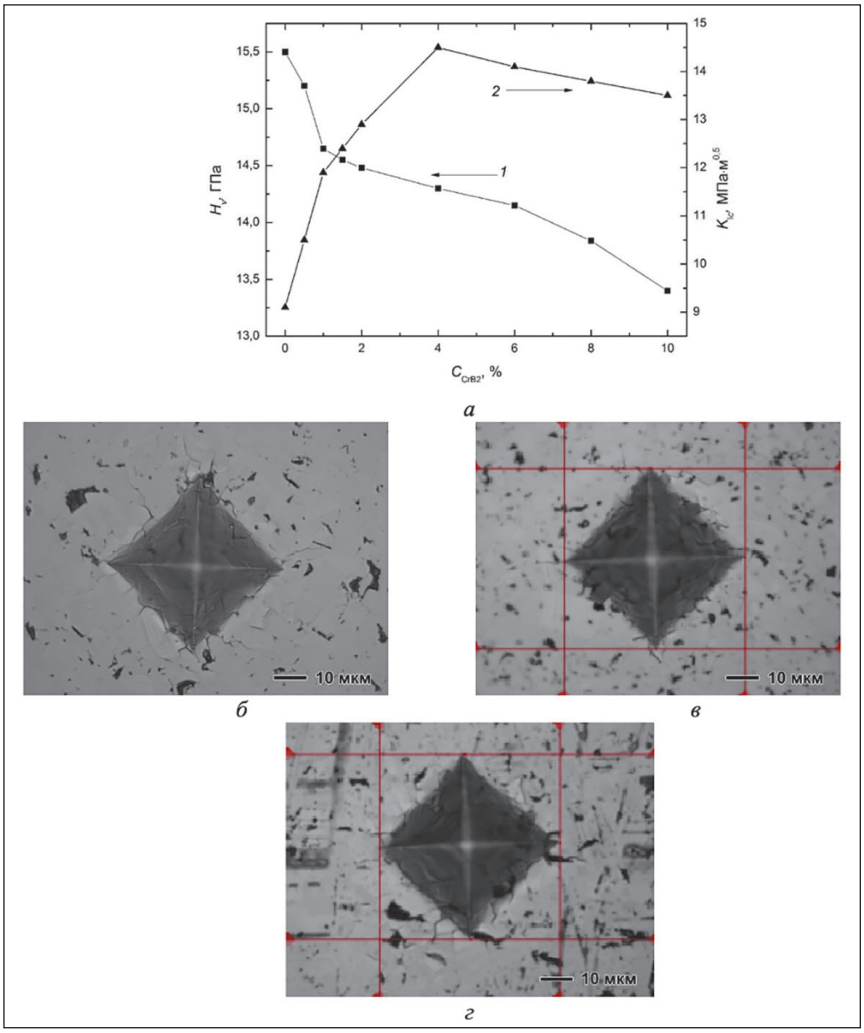

Рисунок 3 – **Зависимости твердости и вязкости разрушения WC-Co – образцов от концентрации CrB_2 (а) и микрофотографии отпечатков индентора при C_{CrB2} = 0 (б), 4 (в) и 10 % (г) (по массе)**

(см. *рис. 3*, б) свидетельствует о возникновении чрезмерной хрупкости композита WC-6Co при отсутствии в нем диборида хрома. В то время как в композите 5 при содержании в нем диборида хрома 4 % (по массе) наблюдается значительно меньшее количество трещин (см. *рис. 3*, в), длина которых также значительно меньше, чем в композите 1. Следует отметить, что максимальное значение K_{IC} достигает при той же концентрации CrB_2, при которой начинается перелом зависимости H (C_{CrB2}). Этот факт не тривиален и заслуживает внимания, поскольку обычно твердость и вязкость разрушения демонстрируют противоположное влияние на структурные изменения материала. С учетом того, что при $C_{CrB2} \geq 4\%$ (по массе) средний размер зерна изменяется не существенно, имеющееся постепенное уменьшение H и K_{IC} при $C_{CrB2} \geq 4$ % (по массе) не находит объяснения с позиций закона Холла-Петча.

Другими словами, размер зерна не является определяющим фактором в наблюдаемом явлении. Наблюдаемые немонотонные зависимости прочности изучаемых композитов от содержания CrB_2 являются результатом сложной комбинации дисперсионного механизма упрочнения и модификации структуры и фазового состава композитов [19, 20].

Следует отметить, что эффективность дисперсионного механизма упрочнения возрастает с увеличением C_{CrB2}, но максимальные значения твердости и вязкости разрушения достигаются при C_{CrB2} = 4 % (по массе). Такому увеличению уровня свойств этого композита может соответствовать изменение фазового состава после спекания и образования конечной структуры.

Заключение и выводы.

1. Добавление 4% CrB_2 в состав КАМ существенно улучшает механические характеристики материала, включая твердость, трещиностойкость, прочность на сжатие и изгиб. Это способствует повышению общей износостойкости и долговечности материалов, используемых в породоразрушающих инструментах.

2. Микромеханический анализ и структура матрицы:

Микромеханические испытания с применением нанотвердомера Nano Indenter G200 и микротвердомера FALCON 500 показали, что при добавлении CrB_2 вязкость разрушения матрицы повысилась на 20–25%. Это обусловлено более равномерным распределением армирующих частиц и улучшенной связью между фазами. Результатом стало снижение вероятности микротрещинообразования и более высокая стабильность инструмента при переменных нагрузках.

3. Повышение эксплуатационной эффективности:

Разработанные КАМ с CrB_2 показали увеличение устойчивости к разрушению при бурении твердых горных пород на 30% по сравнению с контрольными образцами без добавки. Это позволило:

- ускорить процессы бурения на 12–15%,
- увеличить ресурс инструмента до 25%,
- сократить число внеплановых остановок, связанных с разрушением бурового инструмента.

Таким образом, данные материалы обеспечивают более стабильную и эффективную работу в сложных условиях.

4. Полученные результаты открывают перспективы для создания нового поколения буровых долот, использующих высококачественное алмазное сырье, что позволит повысить экономическую эффективность и снизить затраты на бурение в сложных геологических условиях.

Таким образом, исследованные композиционные материалы с добавками CrB_2 имеют значительный потенциал для применения в нефтегазовой отрасли, а их внедрение в производство буровых инструментов может значительно улучшить результаты бурения и сократить время, необходимое для освоения новых месторождений.

Благодарности: *данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP23484450).*

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 CrB2 additive on the morphology, structure, microhardness and fracture resistance of Diamond Composites based on WC-Co Matrix. Materialia, 25, 101546. https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101546
2. V. Khomenko, O. Pashchenko, B. Ratov, R. Kirin, S. Svitlychnyi, A. Moskalenko. Optimization of the technology of hoisting operations when drilling oil and gas wells. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1348 (2024) 012008. doi:10.1088/1755-1315/1348/1/012008.
3. Б. Ратов, Б. Федоров, А.Куттыбаев, М.Сарбопеева, Б. Бораш. Буровые инстру-менты, оснащенные комбинированным вооружением, для сооружения гидрогеологических и геотехнологических скважин. ГИАБ, 2022. Выпуск 9, Стр. 42-59. [Ratov B, Fedorov B, Kuttybaev A., Sarbopeeva M., Borash B. Burovye instrumenty, osnashchennye kombinirovannym vooruzheniem, dlya sooruzheniya gidro-geologicheskih i geotekhnologicheskih skvazhin. GIAB, 2022. Vypusk 9, Str. 42-59.].
4. Ratov, Boranbay, Rucki, M., Fedorov, B., Hevorkian, E., Siemiatkowski, Z., Muratova, S., Omirzakova, E., Kuttybayev, A., Mechnik, V., & Bondarenko, N. Calculations on enhancement of polycrystalline diamond bits through addition of superhard diamond-reinforced elements. Ma-chines, 11(4), 453. https://doi.org/10.3390/machines11040453
5. J.Musil. Tribological and mechanical properties of nanocrystalline n-TiC/a-C nanocomposite thin films. J. Vac. Sci. Technol. A. 2010. V. 28, no. 2. P. 244-249.
6. A.Duszová, R.Halgaš, M.Bl'anda, P.Hvizdoš, F.Lofaj, J.Dusza, J.Morgiel. Nanoindentation of WC-Cohardmetals. J. Eur. Ceram. Soc. 2013, 33, 2227-2232.
7. Renato Pero, Giovanni Maizza, Roberto Montanari, Takahito Ohmura. Nano-indentation properties of tungsten carbide-cobalt composites as a function of tungsten carbide crystal orientation. J. Materials. 2020. Vol. 13, no. 9. art. 2137.
8. V.A.Aleksandrov, A.N.Zhukovskij, V.A.Mechnik. Temperature field and wear of inhomogeneous diamond wheel at convective heat exchange. Trenie I Iznos. 1994. Vol. 15, no. 1. P. 27–35.
9. M.Christensen, G.Wahnstrom, S. Lay. Morphology of WC grains in WC–Co alloys: Theoretical determination of grain shape [J]. Acta Mater. 2007. Vol. 55. P. 1515-1521.
10. Brookes Kenneth J. A. World directory and handbook hard materials. Fifth edition. UK: International Carbide Data, 1992. 464 p.
11. Mamalis, A., Mechnik, V., Morozow, D., Ratov, B., Kolodnitskyi, V., Samociuk, W., & Bondarenko, N. Properties of cutting tool composite material diamond-(Fe-Ni-Cu-Sn) reinforced with nano-VN. Machines, 10(6), 410. https://doi.org/10.3390/machines10060410
12. M.Dudlia, J.Pinka, K.Dudlia, V.Rastsvietaiev, M.Sidorova. Influence of Dispersed Systems on Exploratory Well Drilling. Solid State Phenomena, 2018, 277, 44-53. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.44
13. Z.Huang, Y. Ma, Q.Li, D. Xie. Geometry and force modeling, and mechanical proper-ties study of polycrystalline diamond compact bit under wearing condition based on numerical analysis // Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – 9(6), 168781401770208. https://doi.org/10.1177/1687814017702080

14. A.O.Ihnatov, J.Haddad, Ye.M.Stavychnyi, M.M.Plytus. Development and Implementa-tion of Innovative Approaches to Fixing Wells in Difficult Conditions // Journal of the Institution of Engineers (India): Series D. 2022. https://doi.org/10.1007/s40033-022-00402-5
15. A.O.Kozhevnykov, A.Yu.Dreus, L.Baochang, A.K.Sudakov Drilling fluid circulation rate influence on the contact temperature during borehole drilling // Scientific Bulletin of National Mining University. 2018, 1, 35-42. https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/14
16. C.Liu, X.Zheng, G.Wang, M.Xu, Z. Li. Research on Drilling Response Characteristics of Two-Wing PDC Bit. Sustainability. 2022, 12(1). 406–406. https://doi.org/10.3390/su12010406
17. A.R.Togasheva, R.Y.Bayamirova, A.T.Zholbassarova, M.D.Sarbopeyeva, M.T.Arshidinova. Pilot field tests of shock-wave treatment of wells at the fields of JSC Ozenmunaigas // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2023. 23(1.1). Pp.719–727. doi 10.5593/sgem2023/1.1/s06.86
18. Б.Т. Ратов, А.Е. Куттыбаев, С.К. Муратова, М.Д. Сарбопеева, А.Б. Калжанова, А.А. Жәнгірханова. Подготовка смесей CrB2 и формирование брикетов для композитов буровых долот. Нефть и газ, 2024, 3 (141). Стр. 35-44. [B.T. Ratov, A.E. Kuttybaev, S.K. Muratova, M.D. Sarbopeeva, A.B. Kalzhanova, A.A. Zhəngirhanova. Podgotovka smesej CrB2 i formirovanie briketov dlya kompozitov burovyh dolot. Neft' i gaz, 2024, 3 (141). Str. 35-44.]
19. А.Е.Куттыбаев Буровые станки. Учебное пособие. КазНИТУ. 2020, 132 стр. ISBN 978-601-08-0263-6. [Kuttybaev A.E. Burovye stanki. Uchebnoe posobie. KazNITU. 2020, 132 str. ISBN 978-601-08-0263-6]
20. А.Н.Давиденко, Б.Т.Ратов, А.А.Игнатов, Қ.Кожахмет, А.Е.Куттыбаев, Ж.М.Кенжегалива. Циркуляционные процессы при бурении скважин и их физико-химические особенности. Монография, Каспийский общественный университет, 2022, 242 стр. ISBN 978-601-08-0261-0. [Davidenko A.N., Ratov B.T., Ignatov A.A., Kozhahmet K., Kuttybaev A.E., Kenzhegalieva Zh.M. Cirkulyacionnye processy pri burenii skvazhin i ih fiziko-himicheskie osobennosti. Monografiya, Kaspijskij obshchestvennyj universitet, 2022, 242 str. ISBN 978-601-08-0261-0]