

УДК 622.21:550.8
ГРНТИ 38.61.01
DOI 10.56525/PTNE3557

ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

***Сундетова П.С., Кожамет Қ.А.**

Университет Есенова, г. Актау, Казахстан

e-mail: perizatsisembaevna@gmail.com, koseke53@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена взаимосвязь геолого-гидрогеологических условий бурения и требований к материалу породоразрушающего инструмента. Особое внимание уделено влиянию физико-механических свойств горных пород, их абразивности, трещиноватости, неоднородности и водонасыщенности на характер изнашивания матрицы и устойчивость алмазосодержащего вооружения. На основе экспериментальных данных по матрицам Fe–Cr–Cu–Ni–Sn с добавкой ZrO₂, сформированным методом искро-плазменного спекания, проанализировано изменение относительной плотности, прочности при сжатии и изгибе, микротвердости и трещиностойкости. Показано, что повышение содержания ZrO₂ до 10 % сопровождается ростом комплекса механических характеристик, что имеет прикладное значение при проходке прочных и абразивных пород, в том числе при строительстве геологоразведочных и гидрогеологических скважин.

Установленные закономерности позволяют обосновать выбор состава и эксплуатационных характеристик матричного материала с учетом конкретных геолого-технических условий бурения. Повышение прочности и микротвердости способствует сопротивлению абразивному изнашиванию, тогда как увеличение трещиностойкости снижает вероятность локального разрушения матрицы при динамических и знакопеременных нагрузках. Это особенно важно при бурении неоднородных, перемежающихся по прочности и абразивности пород, где породоразрушающий инструмент подвергается комплексному механическому и гидродинамическому воздействию.

Сформулирована инженерно-геологическая интерпретация полученных результатов: устойчивость матрицы к абразивному, ударно-циклическому и контактному воздействию способствует сохранению работоспособности алмазосодержащего вооружения в неоднородном разрезе. Полученные результаты создают научно-практическую основу для целенаправленного подбора состава матрицы алмазного породоразрушающего инструмента, повышения его износостойкости, сохранения геометрических параметров рабочей части и увеличения ресурса при бурении геологоразведочных и гидрогеологических скважин.

Ключевые слова: геология, гидрогеология, бурение скважин, горные породы, алмазный инструмент, композиционный материал, ZrO₂, износостойкость, прочность, трещиностойкость.

Введение

Эффективность строительства геологоразведочных и гидрогеологических скважин определяется не только режимами бурения, но и соответствием породоразрушающего инструмента строению разреза. При пересечении прочных, абразивных и трещиноватых пород рабочие элементы коронки испытывают сочетание нормальных и касательных контактных нагрузок, вибраций и повторных ударных воздействий. Для гидрогеологических скважин дополнительное значение имеет сохранение проектного диаметра ствола и устойчивой работы инструмента в интервалах чередования водоносных и слабопроницаемых пород. Поэтому свойства матрицы, удерживающей алмазные зерна, следует рассматривать как один из факторов технологической надежности вскрытия геологического разреза.

В исходном материале показано, что композиты Fe-Cr-Cu-Ni-Sn перспективны для изготовления буровых и камнеобрабатывающих инструментов, однако их применение в прочных и абразивных породах ограничивается недостаточными значениями твердости, прочности и трещиностойкости. Одним из направлений повышения эксплуатационных свойств является модифицирование структуры дисперсными добавками и применение искро-плазменного спекания, позволяющего ограничивать рост зерен и управлять формированием микроструктуры. Особый интерес представляет ZrO_2 , для которого характерен трансформационный механизм упрочнения.

Цель работы - установить прикладное значение изменения физико-механических свойств матрицы Fe-Cr-Cu-Ni-Sn при введении ZrO_2 для условий бурения геологоразведочных и гидрогеологических скважин в прочных и абразивных породах.

Геолого-гидрогеологические предпосылки к повышению износостойкости инструмента

Геологический разрез скважины представляет собой последовательность пород, различающихся минералогическим составом, прочностью, абразивностью, трещиноватостью и степенью выветрелости. При переходе от относительно мягких прослоев к более прочным породам характер разрушения забоя и нагружения режущих элементов изменяется. В абразивных породах ускоряется износ металлической связки, а при повышенной трещиноватости и неоднородности возрастает вероятность локальных ударных нагрузок. В результате качество матрицы определяет способность удерживать алмазные зерна и противостоять преждевременному выкрашиванию.

Для гидрогеологических скважин стабильность работы коронки важна также с позиции последующего оборудования ствола. Неравномерный износ калибрующих и режущих элементов способен ухудшать геометрию скважины, осложнять спуск обсадных колонн и фильтров. Следовательно, повышение сопротивления матрицы сжатию, изгибу и зарождению трещин имеет не только материаловедческое, но и геолого-технологическое значение. В представленном списке литературы вопросы бурения и оборудования гидрогеологических скважин рассматриваются совместно с совершенствованием породоразрушающего инструмента [1-3, 12, 15].

С учетом этих условий рациональный материал алмазосодержащей матрицы должен сочетать высокую плотность, твердость и прочность с достаточной трещиностойкостью. Избыточная хрупкость нежелательна, поскольку циклические нагрузки в неоднородных породах способствуют развитию микротрещин. Именно поэтому оценка только твердости недостаточна: требуется совместный анализ плотности, прочности при сжатии и изгибе, микротвердости и вязкости разрушения.

Материалы и методы исследования

Исследованы образцы металлической матрицы на основе Fe-Cr-Cu-Ni-Sn с содержанием ZrO_2 0, 2, 6 и 10 %. В исходной работе приведены составы: 26Fe-25Cr-32Cu-9Ni-8Sn без добавки; 25,48Fe-24,5Cr-31,36Cu-8,82Ni-7,84Sn + 2 ZrO_2 ; 24,44Fe-23,5Cr-30,08Cu-8,46Ni-7,52Sn + 6 ZrO_2 ; 23,4Fe-22,5Cr-28,8Cu-8,1Ni-7,2Sn + 10 ZrO_2 . Образцы формировали методом искро-плазменного спекания в интервале температур 20-1000 °С при давлении 30 МПа.

После спекания заготовки шлифовали и полировали. Относительную плотность определяли с использованием гидростатической плотности и действительной плотности, измеренной гелиевым пикнометром Micromeritics AccuPyc 1340. Прочность при изгибе определяли методом трехточечного изгиба на Instron 3344, прочность при сжатии - на сервогидравлической машине MTS 870 Landmark. Микротвердость по Виккерсу и параметры радиальных трещин оценивали на FALCON 500. Вязкость разрушения определяли по отпечаткам при нагрузке 25 Н; для каждого образца использовали десять отпечатков. Погрешности механических характеристик рассчитывали как среднеквадратические отклонения.

Результаты и их геолого-технологическая интерпретация

Увеличение содержания ZrO_2 сопровождалось последовательным ростом относительной плотности: от 0,987 для исходной матрицы до 0,992 при 2 %, 0,996 при 6 % и 0,997 при 10 % ZrO_2 .

Снижение пористости принципиально важно для бурового инструмента, поскольку поры и микродефекты выступают концентраторами напряжений при повторном контакте с породой.

ZrO ₂ , %	$\rho_{\text{отн}}$	R _{cm} , МПа	R _{bm} , МПа	HV, ГПа	K _{Ic} , МПа·м ^{0.5}
0	0,987	950±35	750±20	8,0±0,25	6,5±0,35
2	0,992	1280±42	980±30	8,26±0,22	7,0±0,4
6	0,996	1450±41	1100±40	8,7±0,45	8,5±0,45
10	0,997	1510±45	1140±35	9,0±0,42	9,2±0,42

Таблица 1 - Изменение физико-механических характеристик матрицы в зависимости от содержания ZrO₂.

Наиболее выраженный эффект установлен для прочностных характеристик. При увеличении содержания ZrO₂ от 0 до 10 % предел прочности при сжатии возрастает с 950±35 до 1510±45 МПа, то есть примерно на 58,9 %, а при изгибе - с 750±20 до 1140±35 МПа, примерно на 52,0 %. Микротвердость повышается с 8,0±0,25 до 9,0±0,42 ГПа (на 12,5 %), вязкость разрушения - с 6,5±0,35 до 9,2±0,42 МПа·м^{0.5} (примерно на 41,5 %). Эти изменения указывают на одновременное повышение сопротивления матрицы пластической деформации и распространению трещин.

При микроиндентировании исходного образца без ZrO₂ наблюдались многочисленные крупные трещины как внутри, так и вокруг отпечатка Виккерса. При 6 и 10 % ZrO₂ количество и длина трещин существенно уменьшались, а при 10 % разрушение материала в окрестности отпечатка было минимальным. В исходном материале это связывается с трансформацией тетрагональной фазы t-ZrO₂ в моноклинную m-ZrO₂, возникновением сжимающих напряжений, тормозящих распространение трещин, а также с измельчением зеренной структуры.

С геологической точки зрения такое сочетание свойств особенно востребовано при бурении неоднородных толщ, где режущая часть инструмента многократно переходит между породами различной прочности. Повышенная прочность при сжатии способствует сопротивлению контактными нагрузкам на забое; прочность при изгибе и вязкость разрушения уменьшают чувствительность матрицы к локальным ударным и изгибающим воздействиям; рост твердости повышает сопротивление абразивному износу. В совокупности это создает предпосылки для более устойчивого удержания алмазных зерен в матрице.

Для гидрогеологического бурения данный результат следует трактовать как материаловедческую основу повышения стабильности работы коронки при проходке твердых прослоев и абразивных интервалов. Вместе с тем представленные лабораторные данные не являются прямым доказательством увеличения механической скорости бурения или ресурса коронки в конкретном водоносном горизонте: для таких выводов необходимы полевые испытания с учетом литологии, трещиноватости, режима промывки, осевой нагрузки и частоты вращения.

Обсуждение

Полученные зависимости позволяют использовать механические характеристики матрицы как критерии при выборе материала для алмазосодержащих элементов. Для интервалов прочных и абразивных пород наиболее перспективным среди исследованных является состав с 10 % ZrO₂, для которого одновременно достигнуты максимальные значения относительной плотности, прочности при сжатии и изгибе, микротвердости и вязкости разрушения. Такой комплекс свойств снижает вероятность того, что повышение твердости будет достигнуто ценой чрезмерной хрупкости. [13].

При проектировании инструмента для конкретного геолого-гидрогеологического разреза эти данные целесообразно учитывать совместно с конструкцией коронки, схемой вооружения, калиброванием и параметрами промывки. Материал матрицы не заменяет геологического обоснования режима бурения, но расширяет диапазон условий, в которых режущие элементы могут сохранять работоспособность. Это особенно актуально при бурении скважин в разрезах с чередованием плотных карбонатных, терригенных и иных абразивных пород, где изменение механических свойств массива вызывает нестационарное нагружение инструмента.

Заключение

1. Геолого-гидрогеологические условия бурения формируют комплекс требований к матрице алмазосодержащего инструмента: сопротивление абразивному износу, контактному сжатию, изгибу и развитию трещин должно обеспечиваться одновременно.

2. Введение ZrO_2 в матрицу Fe-Cr-Cu-Ni-Sn и искро-плазменное спекание обеспечили рост исследованных физико-механических характеристик. При 10 % ZrO_2 получены $R_{отн} = 0,997$, $R_{cm} = 1510 \pm 45$ МПа, $R_{bm} = 1140 \pm 35$ МПа, $HV = 9,0 \pm 0,42$ ГПа и $KIc = 9,2 \pm 0,42$ МПа·м^{0,5}.

3. По сравнению с исходной матрицей прочность при сжатии увеличилась примерно на 58,9 %, при изгибе - на 52,0 %, микротвердость - на 12,5 %, вязкость разрушения - на 41,5 %. Уменьшение трещинообразования при микроиндентировании подтверждает повышение сопротивления локальному разрушению.

4. Результаты обосновывают перспективность исследованной матрицы с 10 % ZrO_2 для алмазосодержащего инструмента, предназначенного для проходки прочных и абразивных пород при строительстве геологоразведочных и гидрогеологических скважин. Для количественной оценки прироста ресурса и показателей бурения необходима последующая производственная проверка в конкретных геологических условиях.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Borowiecka-Jamrozek J.M., Konstanty J., Lachowski J. The application of a ball-milled Fe–Cu–Ni powder mixture to fabricate sintered diamond tools. Arch. Found. Eng. 2018. Vol. 18, no. 1. P. 5–8.

3. Konstanty J., Romański A., Baczek E., Tyrła D. New wear resistant iron-base matrix materials for the fabrication of sintered diamond tools. Arch. Met. Mater. 2015. Vol. 60. P. 633–637.

4. Han P., Xiao F. R., Zou W. J., Liao B. Influence of hot pressing temperature on the microstructure and mechanical properties of 75% Cu–25% Sn alloy. Mater. Des. 2014. Vol. 53, no. 1. P. 38–42.

5. Konstanty J. Powder Metallurgy Diamond Tools. Oxford, UK: Elsevier, 2005. 152 p.

6. Hou M., Guo S., Li Y., Gao J., Ye X. Fabrication of FeCu matrixed diamond tool bits using microwave hot-press sintering. J. Powder Technol. 2018. Vol. 338. P. 36–43.

7. Borowiecka-Jamrozek J. M., Konstanty J., Lachowski J. The application of a ball-milled Fe–Cu–Ni powder mixture to fabricate sintered diamond tools. Arch. Found. Eng. 2018. Vol. 18, no. 1. P. 5–8.

8. Li W., Zhan J., Wang S., Dong H., Li Y., Liu Y. Characterizations and mechanical properties of impregnated diamond segment using Cu–Fe–Co metal matrix. Rare Metals. 2012. Vol. 31. P. 81–87.

9. Khomenko, V., Ratov, B., Koroviaka, Y., Sarbopeyeva, M., & Makyzhanova, A. (2026, May). Kinematic analysis and performance optimization of PDC drill bits with rolling cutters. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1630, No. 1, p. 012078). IOP Publishing.

10. Sudakov, A., Sarbopeyeva, M., Isakova, M., Narbayev, M., Aliakbar, M., & Shumov, A. (2026). Results of Research into the Physical and Mechanical Properties of Biopolymer Gravel Composite Block Filters for Hydrogeological Wells. Advances in Science and Technology, 172, 226-237.

11. Umirova, G., Kuttybayev, A., Khomenko, V., Muratova, S., Biletskiy, M., Ratov, B., ... & Zhang, L. (2025). Advanced approaches to depth optimization in large-diameter water well drilling in mangystau peninsula. Engineered Science, 36, 1605.

12. Ратов Б.Т., Федоров Б.В., Куттыбаев А.Е., Русякова И.А., Утепов З.Г., Элиакбар М.М., Сундетова П.С. Обоснование параметров алмазной буровой коронки для минерализованных твердых горных пород // Нефть и Газ. – 2026. – № 4 (154). – С. 61–73. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-4.04>

13. Сейдалиев А.А., Калжанова А.Б., Гусманова А.Г., Ратов Б.Т., Куттыбаев А.Е., Сарбопеева М.Д., Утепов З.Г. Оптимизация эксплуатационных свойств бурового инструмента с

алмазосодержащими элементами // Нефть и Газ. – 2025. – № 2 (146). – С. 42–52. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2025-2.03>

14. Ратов Б.Т., Куттыбаев А.Е., Муратова С.К., Сарбопеева М.Д., Калжанова А.Б., Жангирханова А.А. Подготовка смесей CrB_2 и формирование брикетов для композитов буровых долот // Нефть и Газ. – 2024. – № 3 (141). – С. 35–44. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-3.02>

15. Pashchenko, O., Rastsvietaiev, V., Sarbopeyeva, M., Kamyshatskyi, O., & Petrenko, V. (2026). Approach to Optimizing Energy Consumption in Rock Destruction through Advanced Design Parameters of Cutting Elements. *Advances in Science and Technology*, 172, 77-86.

ҰҢҒЫМАЛАРДЫ БҰРҒЫЛАУДА ТОЗУҒА ТӨЗІМДІ АЛМАСТЫ КОМПОЗИТТЕРДІ ҚОЛДАНУДЫҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ГИДРОГЕОЛОГИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕМЕСІ

***Сундетова П.С., Қожахмет Қ.Ә.**

Есенов университеті, Ақтау қ, Қазақстан

e-mail: perizatsisembaevna@gmail.com, koseke53@mail.ru

Аңдатпа. Бұрғылаудың геологиялық-гидрогеологиялық жағдайлары мен тау жыныстарын бұзатын құралдың материалына қойылатын талаптар арасындағы өзара байланыс қарастырылған. Тау жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттерінің, олардың абразивтілігінің, жарықшақтылығының, әртектілігінің және сумен қанығуының матрицаның тозу сипатына және құрамында алмасы бар қаруланудың төзімділігіне әсеріне ерекше назар аударылған. Ұшқынды-плазмалық күйдіру әдісімен қалыптасқан, ZrO_2 қоспасы бар Fe-Cr-Cu-Ni-Sn матрицалары бойынша эксперименталды деректер негізінде салыстырмалы тығыздықтың, сығылу және иілу кезіндегі беріктіктің, микроқаттылық пен жарықшаққа төзімділіктің өзгеруі талданды. ZrO_2 мөлшерін 10%-ға дейін арттыру механикалық сипаттамалар кешенінің өсуімен ұласатыны көрсетілген, бұл берік және абразивті жыныстарды ұңғуде, соның ішінде геологиялық барлау және гидрогеологиялық ұңғымаларды салуда қолданбалы маңызға ие.

Анықталған заңдылықтар бұрғылаудың нақты геологиялық-техникалық жағдайларын ескере отырып, матрицалық материалдың құрамы мен пайдалану сипаттамаларын таңдауды негіздеуге мүмкіндік береді. Беріктік пен микроқаттылықтың артуы абразивті тозуға қарсы тұруға ықпал етеді, ал жарықшаққа төзімділіктің жоғарылауы динамикалық және айнымалы таңбалы жүктемелер кезінде матрицаның жергілікті бұзылу ықтималдығын төмендетеді. Бұл тау жыныстарын бұзатын құрал кешенді механикалық және гидродинамикалық әсерге ұшырайтын әртекті, беріктігі мен абразивтілігі кезектесіп келетін жыныстарды бұрғылау кезінде өте маңызды.

Алынған нәтижелердің инженерлік-геологиялық интерпретациясы тұжырымдалған: матрицаның абразивті, соққылы-циклдік және контактілі әсерлерге төзімділігі әртекті кимеде құрамында алмасы бар қаруланудың жұмысқа қабілеттілігін сақтауға ықпал етеді. Алынған нәтижелер алмасты тау жыныстарын бұзатын құрал матрицасының құрамын мақсатты түрде таңдау, оның тозуға төзімділігін арттыру, жұмыс бөлігінің геометриялық параметрлерін сақтау және геологиялық барлау мен гидрогеологиялық ұңғымаларды бұрғылау кезінде ресурсын ұзарту үшін ғылыми-тәжірибелік негіз қалайды.

Түйін сөздер: геология, гидрогеология, ұңғымаларды бұрғылау, тау жыныстары, алмас құрал, композициялық материал, ZrO_2 , тозуға төзімділік, беріктік, жарықшаққа төзімділік.

GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL JUSTIFICATION FOR THE USE OF WEAR-RESISTANT DIAMOND-BEARING COMPOSITES IN WELL DRILLING

***Sundetova P.S., Kozhakhmet K.A.**

Yessenov University, Aktau, Kazakhstan

e-mail: perizatsisembaevna@gmail.com, koseke53@mail.ru

Abstract. The relationship between the geological and hydrogeological conditions of drilling and the material requirements for core drilling tools is considered. Particular attention is paid to the influence of the physical and mechanical properties of rocks, their abrasiveness, fracturing, heterogeneity, and water saturation on the nature of matrix wear and the stability of diamond-bearing cutters. Based on experimental data for Fe–Cr–Cu–Ni–Sn matrices with ZrO₂ addition formed by spark plasma sintering, the changes in relative density, compressive and bending strength, microhardness, and fracture toughness were analyzed. It is shown that increasing the ZrO₂ content up to 10% is accompanied by a growth in the set of mechanical characteristics, which has practical significance when drilling through hard and abrasive rocks, including the construction of exploration and hydrogeological wells.

The established patterns make it possible to justify the choice of composition and operational characteristics of the matrix material, taking into account specific geological and technical drilling conditions. Increased strength and microhardness contribute to resistance to abrasive wear, while an increase in fracture toughness reduces the probability of local matrix failure under dynamic and alternating loads. This is especially important when drilling heterogeneous rocks alternating in strength and abrasiveness, where the drilling tool is subjected to complex mechanical and hydrodynamic impacts.

An engineering-geological interpretation of the obtained results is formulated: the matrix resistance to abrasive, impact-cyclic, and contact impacts contributes to maintaining the performance of diamond-bearing cutters in a heterogeneous profile. The obtained results create a scientific and practical basis for the targeted selection of the matrix composition of diamond drilling tools, increasing its wear resistance, preserving the geometric parameters of the working part, and extending the service life when drilling exploration and hydrogeological wells.

Keywords: geology, hydrogeological conditions, well drilling, rocks, diamond tool, composite material, ZrO₂, wear resistance, strength, fracture toughness.