

Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова

УДК 622.24 (043)

На правах рукописи

УТЕПОВ ЗАМАНБЕК ГАБИТОВИЧ

Разработка эффективных технико-технологических средств для бурения и освоения геотехнологических скважин с высокими эксплуатационными характеристиками

8D07208 – Геология и разведка месторождений полезных ископаемых

Диссертация на соискание степени
доктора философии PhD

Научные консультанты:

Қожахмет Қ.Ә. : к.г-м.н., ассоциированный
профессор

Ратов Б.Т. д.т.н., профессор

Зарубежный научный консультант:

Хоменко В.Л. к.т.н., доцент, кафедра

нефтегазовой инженерии и бурения, НТУ

«Днепро́вская политехника»

г. Днепр, Украина

Республика Казахстан
Актау, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОПАСТНЫХ БУРОВЫХ ДОЛОТ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ	16
1.1 Современные лопастные долота, их конструкция и область применения....	16
1.2 Конструкция лопастных долот, обеспечивающая непрерывный процесс бурения до полного износа рабочих элементов	21
1.2.1 Лопастные долота с твердосплавным вооружением.....	21
1.2.2 Конструкция лопастных долот с комбинированным вооружением.....	25
1.3 Постановка задач исследования	29
Выводы по разделу 1.....	32
2 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО- ИСКРОВОГО СПЕКАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ.....	34
2.1 Исходные материалы и приготовление алмазосодержащих смесей для спекания образцов КАМ.....	36
2.2 Спекание образцов твердосплавных матриц и КАМ	39
2.3 Методика изготовления шлифов спеченных образцов	40
2.4 Методика и результаты измерения шероховатости спеченных образцов твердосплавных матриц.....	43
2.5 Методика исследования морфологии и микроструктуры спеченных образцов методом сканирующей электронной микроскопии	44
2.6 Методика исследования микроструктуры методом оптической микроскопии	45
2.7 Методика измерения нанотвердости и модуля упругости спеченных образцов.....	46
2.8 Методика определения износостойкости спеченных образцов КАМ	47
2.9 Методика испытаний алмазных буровых инструментов на износостойкость	49
Выводы по разделу 2.....	50
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗНАШИВАНИЯ СПЕЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗРАБОТАННЫХ НА ИХ ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТОВ	51
3.1 Закономерности изнашивания образцов КАМ	52
3.1.1 Спекание образцов КАМ для исследования износостойкости	52
3.1.2 Исследование закономерностей изнашивания образцов КАМ.....	54
3.1.3 Исследование морфологии поверхностей трения образцов КАМ методом оптической микроструктуры.....	55
3.1.4 Исследование микроструктуры образцов КАМ методом сканирующей электронной микроскопии	60
3.1.5 Фрактографический анализ образцов КАМ.....	67

3.2 Исследование изнашивания алмазных буровых инструментов.....	72
3.2.1 Изготовление бурового инструмента.....	72
3.2.2 Исследование закономерностей изнашивания усовершенствованных резцов.....	73
Выводы по разделу 3.....	78
4 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАЗРАБОТАННОГО ПОРОДРАЗРУШАЮЩЕГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА.....	80
4.1 Опытно-промышленные испытания бурового долота типа пикобур.....	80
4.2 Расчет ожидаемого эффекта от внедрения разработанного пикообразного бурового инструмента.....	85
Выводы по разделу 4.....	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	89
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Карта Шу-Сарысуской ураново-рудной провинции.....	99
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Административная карта расположения месторождения Буденовское.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ В– Патент на полезную модель «Буровое долото типа пикобур».....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ Г– Способ изготовления гравийного фильтра блочного типа	103
ПРИЛОЖЕНИЕ Д– Акт производственных испытаний пикобура.....	105

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты и нормативные документы:

«Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», Высшая аттестационная комиссия МОН РК, № 377-3ж.

ГОСТ 7.32-2017 – Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 7.1-2003 – Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

Правила присуждения ученых степеней, утвержденных приказом МОН РК от 31 марта 2011 года №127.

Государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан послевузовское образование. Докторантура. ГОСО РК 5.04.034 – 2011.

Правила присуждения ученых степеней от 31 марта 2011 года №127; межгосударственные стандарты: ГОСТ 7.32-2001 (изменения от 2006 г.). Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 8.417-81 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин.

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 7.9-95 (ИСО 214-74) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу Реферат и аннотация. Общие требования.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Буровое оборудование – комплекс машиностроительной продукции, которая используется при бурении скважин. Обычно термин относят к бурению нефтегазовых скважин.

Буровая коронка – породоразрушающий инструмент, предназначенный для вращательного бурения геологоразведочных скважин кольцевым забоем с отбором керна, состоящий из короночного кольца (корпуса), матрицы с режущими элементами, разделенной на сектора промывочными каналами (пазами). Один из элементов бурового оборудования.

Промывочная система – это совокупность конструктивных элементов, обеспечивающих течение промывочной жидкости через породоразрушающий инструмент, его охлаждение и вынос шлама во время бурения.

Породоразрушающий инструмент – инструмент, предназначенный для разрушения и углубления забоя скважины.

Буровое долото – породоразрушающий инструмент, предназначенный для разрушения забоя по всей его площади.

Рабочие элементы породоразрушающего инструмента – элементы (твердосплавные резцы, алмазно-твердосплавные резцы, алмазные зерна), входящие в состав инструмента, непосредственно взаимодействующие с горной породой и передающие внешние нагрузки для разрушения забоя скважины.

PDC долота (Polycrystalline Diamond Compact Bits) – это долота, изготовленные по самой последней технологии для бурения скважин на воду, нефть и газ или геотермальных скважин. PDC долота изготавливаются из высококачественной стали и армируются алмазными поликристаллическими резцами. Размер и количество резцов, зависят от количества лопастей и диаметра долота.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$C_{\text{алмаз}}$	алмаз
WC	карбид вольфрама
Co	кобальт
CrB ₂	диборид хрома
Al ₂ O ₃	оксид алюминия
Cr ₃ C ₂	карбид хрома
VC	карбид ванадия
k	коэффициент износа
μ	коэффициент трения
R_a	шероховатость
H	твердость
E	модуль упругости
W_R	скорость износа композита по весу
W_V	скорость износа композита по объему
W_S	удельная скорость износа композита
v	скорость износа породоразрушающего инструмента
K_{1c}	вязкость разрушения
Δm	потеря массы режущей части резцов до и после испытаний
F	площадь сечения волновода
H/E	относительный параметр для определения сопротивления материала матрицы упругой деформации
H^3/E^2	относительный параметр для определения сопротивления материала матрицы пластической деформации
C	углерод
T	температура
p	давление
ε	относительная скорость
D	среднее значение области когерентного рассеяния
$\rho_{\text{отн}}$	относительная плотность композита
H_V	твердость по Виккерсу
PDC	polycrystalline diamond compact
КАМ	композиционные алмазосодержащие материалы
АТП	алмазно-твердосплавная пластина
СЭМ	сканирующая электронная микроскопия
ПИС	плазменно-искровое спекание

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технологической проблемы

Потребность в буровых алмазных инструментах с улучшенными механическими и эксплуатационными характеристиками для добычи полезных ископаемых в республике Казахстан и в мире с каждым годом быстро растет. Бурение технологических и инженерно-геологических скважин в условиях сложных и переменных геолого-технических разрезов требует постоянного совершенствования породоразрушающего инструмента. Особенности таких разрезов – чередование мягких и плотных пород, наличие пластичных глин, а также развитая трещиноватость нижних интервалов – предъявляют к долотам повышенные требования по устойчивости, износостойкости и стабильности работы. Наиболее острой становится задача обеспечения равномерной работы режущих элементов и исключения так называемого эффекта «зависания» инструмента, который приводит к снижению механической скорости бурения и неравномерному износу вооружения.

Долгое время основным типом бурового инструмента для таких условий оставались твердосплавные лопастные долота и пикобуры. Они демонстрируют удовлетворительную эффективность при бурении легкоразрушаемых пород верхнего интервала разреза, однако теряют производительность при переходе к более плотным слоям. Существующие конструкции таких долот допускают локальный износ вблизи оси, что вызывает нестабильную работу инструмента и прерывистую углубку забоя. При этом износ в центральной зоне нарушает равновесие нагрузок, увеличивает осевую вибрацию и приводит к «зависанию» – временному прекращению бурения без выхода инструмента из скважины. Это явление особенно часто наблюдается при бурении пластичных, вязких глин и чередующихся пород с плотными включениями, где сопротивление породы резко возрастает по мере продвижения долота.

Появление и активное внедрение в практику долот с поликристаллическими алмазными резцами (PDC) стало важным этапом повышения эффективности бурения. PDC резцы обладают высокой износостойкостью, сохраняют режущую способность на больших интервалах и обеспечивают значительное повышение механической скорости проходки. Однако стандартные конструкции PDC долот были ориентированы в первую очередь на однородные, малотрещиноватые породы и непрерывный процесс разрушения. В условиях переменной литологии и высокой трещиноватости эффективность таких долот существенно снижается. В трещиноватых породах, где наблюдаются значительные потери промывочной жидкости, ухудшаются условия очистки забоя и отвода тепла от режущих элементов. В результате PDC резцы подвергаются локальному перегреву, термическому старению и ускоренному абразивному износу. Дополнительно, резкое изменение сопротивления породы при переходе из связных участков в трещиноватые приводит к неравномерному нагружению резцов и возникновению вибраций, снижающих срок их службы.

Еще одной проблемой при бурении трещиноватых пород является нерегулярное разрушение забоя: резец может неожиданно провалиться в пустоту (трещину) или резко натолкнуться на выступ породы, что вызывает значительные ударные и крутильные нагрузки. Традиционные PDC резцы, особенно без дополнительных модификаций, плохо переносят такие режимы, поскольку изначально проектировались для стабильных условий резания.

В этих условиях логичным развитием конструктивных решений становится переход к комбинированному вооружению бурового долота, сочетающему твердосплавные и PDC резцы. Такая комбинация позволяет распределить функциональные задачи между различными типами резцов: твердосплавные зубья воспринимают ударные и абразивные нагрузки на периферии, где чаще всего происходит контакт с неоднородностями породы, а PDC резцы обеспечивают эффективное резание в центральной и промежуточной зонах. Однако простое объединение резцов разного типа не гарантирует желаемого результата. Необходима рациональная расстановка резцов по радиусу, а также согласование глубины резания, формы посадочных гнезд, гидродинамических каналов и профиля лопастей. Только при комплексном подходе комбинированное вооружение способно повысить устойчивость долота, предотвратить «зависание» и повысить проходку на одно долото.

При этом отдельного внимания требует совершенствование самих PDC резцов. Для оснащения инструментов для бурения горных пород используются композиционные алмазосодержащие материалы (КАМ) на основе WC–Co-сплавов (композиты системы $C_{алмаз}-(WC-Co)$), поскольку они обладают хорошим сочетанием твердости, износостойкости, прочности и трещиностойкости, а также рядом других полезных свойств. От качества этих инструментов зависит скорость бурения и объем добычи полезных ископаемых. Современные буровые инструменты должны не только обеспечивать высокую эффективность работы, но и соответствовать экологическим стандартам, минимизируя отрицательное воздействие на окружающую среду. Механические и эксплуатационные свойства буровых инструментов зависят от физико-механических и режущих свойств композитов $C_{алмаз}-(WC-Co)$. Спеченные КАМ обладают свойствами, существенно отличными от свойств каждого отдельно взятого компонента, входящего в их состав, и, в то же время, частично обладая свойствами металла (например, пластичностью, теплопроводностью) и керамики (например, высокими твердостью, упругостью и термостойкостью). Эти свойства зависят от фазового состава, микроструктуры и морфологии, которые, в свою очередь, зависят от физико-механических свойств их составляющих, способов и технологических режимов спекания. Некоторые композиты системы $C_{алмаз}-(WC-Co)$ обладают такими механическими и эксплуатационными свойствами, которые недостижимы в традиционных материалах.

Однако в процессе бурения прочных и абразивных горных пород твердосплавная матрица подвергается сильному абразивному, усталостному и адгезионному изнашиванию, что ограничивает практическое применение КАМ и снижает ресурс их эксплуатации. При этом на рабочей поверхности КАМ в процессе

бурения скважин в прочных и абразивных горных породах протекают физико-химические процессы, которые могут привести к необратимым изменениям в микроструктуре твердосплавной матрицы. Кроме того, из-за слабой адгезии между алмазными зёрнами и матрицей они целиком могут выпадать из твердосплавной матрицы во время работы КАМ, что существенно снижает износостойкость породоразрушающего инструмента.

К недостаткам рассматриваемых КАМ следует отнести графитизацию алмазных зёрен и интенсивный рост карбидных зёрен, происходящие при их спекании, а также хрупкость твердосплавной матрицы.

Поэтому улучшение алмазоудержания, повышение прочности, надёжности и износостойкости композитов $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$, а также разработка эффективных инструментов на их основе является важной задачей науки и техники, поскольку это значительно расширяет область их применения и влияет на добычу полезных ископаемых.

В теорию и развитие технологии получения композиционных материалов весомый вклад внесли известные ученые Скороход В.В., Кислый П.С., Новиков Н.В., Туркевич В.З., Александров В.А., Шило А.Ю., Лисовский А.Ф., Мечник В.А., Barrer R.M., Clark P.W., Coble R.L., Kingery W.D., Nabarro F.R.N., Nicholas M., Scott P.

В развитии техники и технологии бурения скважин различного назначения большой вклад внесли зарубежные и отечественные ученые и производственники: Воздвиженский Б.И., Куличихин Н.И., Шамшев Ф.А., Башкатов Д.Н., Козловский Е.А., Панков А.В., Квашнин Г.П., Башкатов А.Д., Олоновский Ю.А., Дрягалин Е.Н., Тесля В.Г., Беляков В.М., Третьяк А.Я., Дубровский В.В., Белицкий А.С., Бессонов Н.Д., Новиков Г.П., Шищенко Р.И., Романенко В.А., Драхлис С.Л., Федоров В.С., Эпштейн Е.Ф., Оницин В.П., Кожевников А.А., Давиденко А.Н., Хоменко В.Л., Мусанов А.М., Танатаров Т.Т., Федоров Б.В., Билецкий М.Т., Ратов Б.Т., Кудайкулова Г.А. и многие другие.

Существует несколько подходов для улучшения свойств и снижения стоимости композиционных материалов. Один из них - применение плазменно-искрового спекания (ПИС), позволяющего быстро получать материалы с мелкозернистой структурой и повышенными механическими характеристиками за счет высокоскоростного нагрева порошковой смеси в вакууме под давлением. Также эффективным является введение в состав карбидов, боридов, нитридов и оксидов переходных металлов, которые препятствуют росту зерна WC и повышают прочность и износостойкость.

Особое значение имеет размер зерна WC, напрямую влияющий на твердость и вязкость разрушения. Добавки ультрадисперсных и нанопорошков (например, Cr_3C_2 , VC, Al_2O_3) способствуют его измельчению и улучшению свойств, однако повышают стоимость материалов.

Для систем $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$ при использовании в буровом инструменте важно изучение структуры и трибологических свойств, особенно при работе в абразивных породах. Добавки CrB_2 и другие многокомпонентные модификаторы

могут снижать коэффициент трения и износ, однако данные по их влиянию ограничены и требуют дальнейшего уточнения.

Таким образом, повышение износостойкости композиционных алмазосодержащих материалов остается *актуальной задачей*, связанной с разработкой эффективных породоразрушающих инструментов. Перспективным направлением является создание композитов системы $C_{\text{алмаз}}-(WC-6\%Co)-CrB_2$ для бурения прочных и абразивных горных пород.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является обоснование конструктивных параметров бурового долота с комбинированным вооружением с высокими эксплуатационными характеристиками в условиях литологически неоднородного и трещиноватого разреза при бурении геотехнологических скважин.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

Исследовать причины неравномерного износа режущих элементов и возникновения явления «зависания» при использовании традиционных твердосплавных и PDC долот.

Обосновать принципы формирования комбинированного вооружения долота, сочетающего твердосплавные и PDC резцы, с учетом распределения нагрузок и условий разрушения породы.

Усовершенствовать состав и структуру PDC резцов путем модификации матричного материала и геометрических параметров режущей части для повышения термостойкости, износостойкости и стойкости к динамическим нагрузкам.

Провести анализ износостойкости КАМ и породоразрушающих инструментов, изготовленных на их основе.

Исследовать влияние добавки CrB_2 в интервале от 0 до 10% на изменение нанотвердости H , модуля упругости E в различных фазах спеченных образцов твердосплавных матриц.

Провести стендовые испытания разработанных инструментов при бурении гранита и подготовить методические материалы для применения новых инструментов в промышленной практике.

Изготовить опытные образцы комбинированного долота, оснащенного вставками из сформированных КАМ и провести производственные испытания разработанных инструментов в условиях Буденовского месторождения (Приложения А, Б).

Идея работы заключается в том, что повышение эффективности бурения технологических скважин в условиях литологически неоднородного и трещиноватого разреза может быть достигнуто за счет разработки бурового долота с комбинированным вооружением, в котором твердосплавные и усовершенствованные PDC резцы работают согласованно, компенсируя слабые стороны друг друга. Устойчивость долота к динамическим нагрузкам, перегреву и неравномерному износу достигается не только за счет рациональной расстановки режу-

щих элементов, но и благодаря направленному улучшению состава и конструкции PDC резцов, изготовленных на основе сформированных методом плазменно-искрового спекания композиционных алмазосодержащих материалов $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$ с добавками CrB_2 , что позволяет адаптировать их к сложным геолого-техническим условиям и существенно увеличить ресурс работы инструмента.

Объект исследования – процессы разрушения горных пород и износа режущих элементов бурового инструмента при бурении технологических скважин в литологически неоднородных и трещиноватых разрезах, конструктивные параметры буровых долот с комбинированным вооружением, влияющие на эффективность и устойчивость их работы в указанных условиях, а также композиционные алмазосодержащие материалы системы $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)-CrB_2$.

Предмет исследования – принципы формирования и оптимизации комбинированного вооружения бурового долота, включая взаимное расположение и функциональное взаимодействие твердосплавных и усовершенствованных PDC резцов, а также влияние состава, структуры, алмазоудержания и износостойкости композиционных алмазосодержащих материалов на повышение стойкости и эффективности инструмента в сложных геолого-технических условиях.

Методика работы. Диссертационная работа основана на комплексном подходе, включающем теоретические, лабораторные, конструкторские и экспериментальные исследования, направленные на создание бурового долота для сложных литологических условий. Основные задачи включали устранение «зависания», разработку комбинированного вооружения и модификацию PDC-резцов.

На первом этапе проведен анализ геолого-технических условий бурения и причин «зависания» долота, выявлены конструктивные и технологические факторы, влияющие на неравномерное разрушение пород. На основе полученных данных сформулированы требования к новой конструкции инструмента.

На втором этапе разработано долото с комбинированным размещением твердосплавных и PDC-резцов и оптимизированной геометрией, исключающей «зависание» за счет рационального распределения вооружения.

Параллельно выполнены исследования по улучшению PDC-резцов. Методом плазменно-искрового спекания получены композиты $WC-Co$ с добавкой CrB_2 в различных концентрациях. Изучались их структура, механические и трибологические свойства.

Применялись современные методы анализа: СЭМ и EDS для исследования микроструктуры, оптическая профилометрия для оценки шероховатости, микротвердость и нанотвердость по методу Виккерса и Оливера–Фара, а также испытания износостойкости по схеме «цилиндр–вал» при обработке гранита. Поверхности износа исследовались с помощью оптической микроскопии.

Разработанное долото реализовано в виде опытного образца и испытано в промышленных условиях на скважине месторождения «Буденовское», где оценивались его производительность, виброустойчивость и износостойкость.

Практическая значимость работы заключается в разработке и экспериментальной проверке конструкции бурового долота для бурения технологических скважин в сложных литологических условиях. Предложенные решения – комбинированное вооружение (твердосплавные и усовершенствованные PDC-резцы) и оптимизированная геометрия, исключая «зависание», – позволяют повысить механическую скорость бурения и износостойкость инструмента.

Научные результаты способствуют развитию технологий получения композиционных алмазосодержащих материалов на основе WC–Co матриц методом плазменно-искрового спекания. Установлены составы шихты и закономерности формирования структуры и износа КАМ системы Салмаз–(WC–Co)–CrB₂, обеспечивающие повышение их износостойкости.

Разработаны композиционные материалы: Салмаз–(66,74WC–4,26Co)–4CrB₂, обеспечивающий снижение показателей износа WR, WV и WS до 2 раз по сравнению с базовым составом; Салмаз–(61,1WC–3,9Co)–10CrB₂, также демонстрирующий снижение износа по всем основным параметрам.

На основе разработанного КАМ изготовлены экспериментальные алмазные импрегнированные коронки, которые при бурении гранита показали износостойкость примерно в 2 раза выше по сравнению с базовым материалом.

Установлено, что максимальная износостойкость коронок достигается при частоте вращения 250 об/мин и нагрузке 900 кг, а минимальная – при 750 об/мин и 1250 кг.

Реализация результатов исследований. Разработанные в ходе исследований долота типа пикобур, прошли сравнительные испытания и показали производительность на 15–20% выше, ранее применяемых пикобуров.

Разработанные PDC резцы на основе новых КАМ при бурении гранита в два раза превышают износостойкость резцов, изготовленных из КАМ на основе WC–6 Co-матриц.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Оптимизация геометрии осевой части бурового долота и перераспределение резцов по радиусу устраняют неравномерность углубки забоя и предотвращают возникновение «зависания», тем самым обеспечивая эффективность разрушения породы и снижение износа породоразрушающих инструментов.

2. Комбинированное вооружение из твердосплавных и PDC резцов обеспечивает равномерное распределение нагрузки на режущие элементы при бурении неоднородных и трещиноватых пород, что способствует снижению вибрационной неустойчивости и увеличению стойкости долота за счет полной отработки вооружения.

3. Введение микропорошка CrB₂ в количестве 4% (по массе) в состав связующей фазы при изготовлении PDC резцов сформированных методом плазменно-искрового спекания повышает их термостойкость и износостойкость за счет формирования термически стабильной структуры, что особенно актуально при бурении в зонах с потерями промывочной жидкости и затрудненным охлаждением.

Научная новизна работы:

Все результаты, представленные в диссертационной работе, сформулированы и получены впервые, имеют научное и практическое значение и способствуют дальнейшему развитию научных основ разработки композиционных алмазосодержащих материалов на основе твердосплавных матриц и инструментов, изготавливаемых на их основе с повышенной износостойкостью.

Впервые установлено, что причиной возникновения явления «зависания» бурового долота при проходке пластичных и плотных пород является не только физико-механическое сопротивление породы, но и нерациональная геометрия осевой части долота, вызывающая концентрацию нагрузки и локальный износ в центральной зоне, что нарушает равномерность углубки забоя. Это позволило обосновать необходимость целенаправленного изменения формы профиля лопастей и перераспределения режущих элементов вблизи оси вращения долота.

Впервые обоснована эффективность комбинированного размещения твердосплавных и PDC резцов в буровом долоте, основанная на различной чувствительности этих элементов к типу нагрузки и характеру породы. Показано, что твердосплавные резцы эффективно воспринимают ударные нагрузки в трещиноватых зонах, в то время как PDC резцы обеспечивают высокую производительность в более однородных участках.

Впервые установлено, что введение в состав КАМ добавки микропорошка диборида хрома CrB_2 в количестве 4 % обеспечивает снижение скорости износа, что обусловлено формированием мелкозернистой структуры твердосплавной матрицы, более равномерным распределением твердости и модуля упругости увеличением относительной плотности и улучшением прочности сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей. Дальнейшее увеличение содержания диборида хрома CrB_2 приводит к повышению скорости износа, что обусловлено повышенной хрупкостью твердосплавной матрицы.

Соответствие направлениям развития науки или государственным программам: Диссертация соответствует ключевым направлениям государственной научно-технической политики и программам, направленным на улучшение промышленности, повышение энергоэффективности и обеспечение экологической безопасности. Ее содержание соответствует целям Государственной программы «Цифровизация экономики Республики Казахстан», Государственной программе «Развитие науки и технологий в Республике Казахстан», а также Государственной программе «Новой промышленной политики Республики Казахстан на 2020–2025 годы»

Личный вклад автора. В работе приведены результаты исследований при непосредственном участии автора в 2023–2026 гг. Основные результаты работы получены диссертантом самостоятельно. Постановка задач, обсуждение результатов и формирование основных выводов проведено совместно с научными консультантами. Лично автором разработаны научные положения, выбор исходных материалов и приготовление смесей для формирования методом плазменно-искрового спекания образцов твердосплавных матриц и композиционных алмазо-

содержащих материалов, принципы и методики теоретических и экспериментальных исследований. Установление закономерностей изнашивания разработанных образцов композиционных алмазосодержащих материалов и импрегнированных алмазных коронок, изготовленных на их основе, при бурении прочных и абразивных горных пород.

Из работ с соавторами в диссертацию включены только те результаты, которые получены автором лично. В диссертации не содержатся идеи и разработки, принадлежащие соавторам.

Достоверность результатов: Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и применением статических методов обработки результатов, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов.

Апробация результатов работ и публикации.

Основные положения диссертационной работы отражены в монографии и 6 научных статьях, в том числе в 1 издании, рекомендованном Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования (КОКНВО), в 2 журналах, входящих в базу данных Scopus Analytics, а также в сборниках международных научных конференций и международном журнале.

В период с 15 декабря 2024 года по 15 января 2025 года пройдена научная стажировка в Северо-Восточном нефтяном университете Китая (NEPU, Дацин, КНР) под руководством PhD Xiaofeng Zhou.

В рамках работы разработан способ изготовления гравийного фильтра блочного типа, на который получен патент Республики Казахстан, а также получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель – буровое долото типа «Пикобур». Основные результаты диссертации отражены в опубликованных трудах (приложения В и Г).

Также получен акт испытания пикообразного долота (приложение Д).

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, общих выводов и рекомендаций, содержит 50 рисунков, 6 таблиц, 17 формул, список литературы из источников.

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Геология и нефтехимический инжиниринг» НАО "Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова".

Благодарности.

В заключение считаю своим долгом выразить благодарность научным консультантам за конструктивные, ценные профессиональные советы и рекомендации: доктору технических наук, профессору Ратову Б.Т., а также кандидату технических наук, доценту Хоменко В.Л. На протяжении всего периода работы автор ощущал постоянное внимание и поддержку со стороны профессора Кожамет К.Ә.

Отдельную благодарность за ценные консультации и рекомендации по совершенствованию структуры и содержания диссертации автор выражает профессорско-преподавательскому составу кафедры «Геология и нефтехимический инжиниринг», а также коллегам.

Особую признательность выражаю декану факультета инжиниринга, доктору PhD Сырлыбекқызы С., заведующей кафедрой «Геология и нефтехимический инжиниринг», доктору PhD Мустапаевой С.Н.

Также выражаю благодарность руководству и коллективу ТОО «СП «РБМ - Казахстан» за предоставленную возможность проведения испытаний разработанного бурового инструмента.

1 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОПАСТНЫХ БУРОВЫХ ДОЛОТ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1 Современные лопастные долота, их конструкция и область применения

В Казахстане одним из самых распространенных породоразрушающих инструментов для бурения скважин различного назначения являются лопастные долота. Причина этого заключается в геологическом строении крупных регионов, способствующих эффективному применению этих инструментов:

– на западе и северо-западе республики разведываются и в основном эксплуатируются крупные нефтегазовые месторождения, связанные с осадочными породами [1-3], которые достаточно эффективно бурятся при использовании твердосплавных лопастных и PDC долот [4-6];

– в юго-западном регионе (Шу-Сарысуская провинция) осуществляется поиск, разведка и интенсивная эксплуатация уранового сырья, связанного с водоносными пластами, залегающими на глубине 750–850 м, а вышерасположенный геологический разрез представлен осадочными породами большой и средней буримости, что способствует использованию лопастных долот различной конструкции [7, 8];

– малая насыщенность республики речной сетью требует интенсивной эксплуатации месторождений подземных вод с помощью сооружения водозаборных скважин, которые пересекают зачастую легко буримые породы и породы средней буримости (исключение предоставляют валунно-галечниковые отложения, где эффективно применение шарошечных долот).

Огромные запасы полезных ископаемых требует сооружения большего количества скважин: поисково-разведочных, разведочных, эксплуатационных, нагнетательных, наблюдательных и т.д. Первоначально из-за низкой стоимости применялись двухлопастные лопастные долота РХ (рыбий хвост) (рис. 1.1). При бурении и необходимости направления скважин стали использовать долота с тремя лопастями (рис. 1.2) [9, 10]. Сохранение диаметра скважины осуществлялось калибровочными твердосплавными резцами, устанавливаемыми на боковой поверхности лопастей.

В мягких породах при бурении технологических скважин при добыче уранового сырья до сих пор применяется пикобур конструкция АО «Волковгеология», который является разновидностью лопастных долот (рис. 1.3).

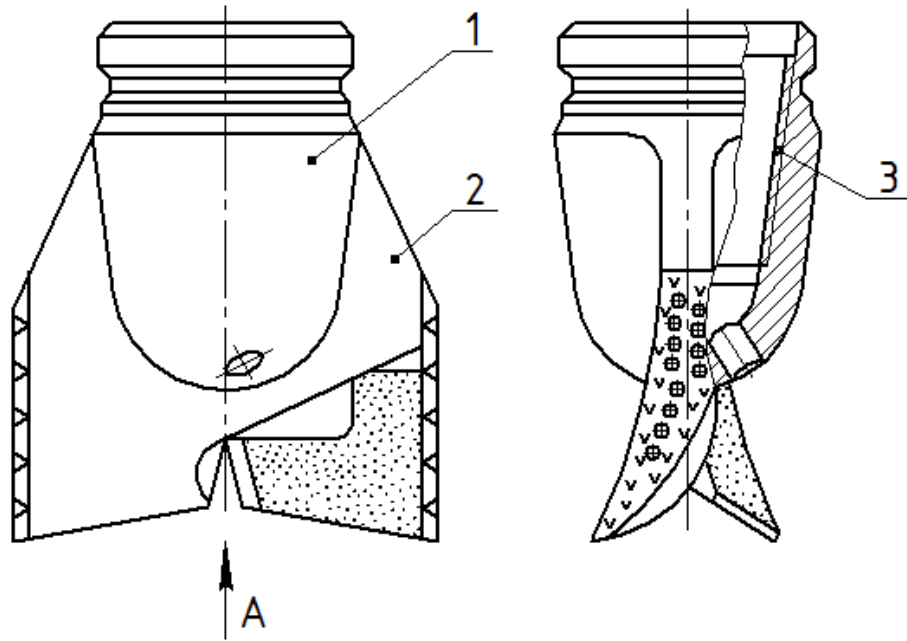
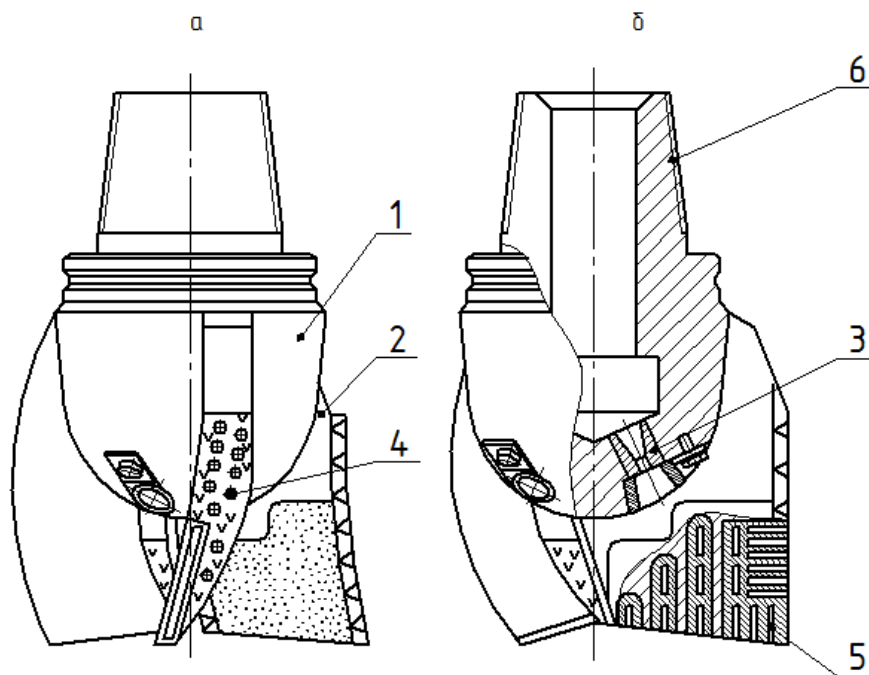
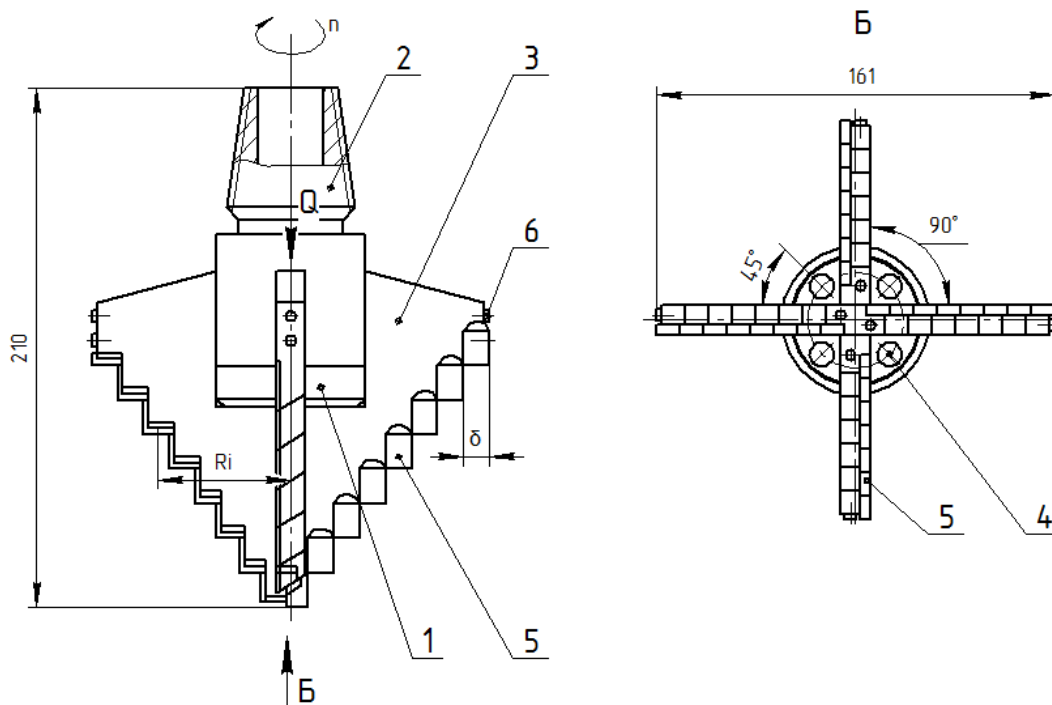


Рисунок 1.1 – Двухлопастные долото «РХ»



1 – корпус, 2 – лопасть; 3 – гидромониторная посадка для повышения скорости струи бурового раствора; 4 – калибровочные твердосплавные элементы; 5 – резцы для разрушения забоя; 6 – резьбы для соединения с КНБК.

Рисунок 1.2 – Трехлопастное долото



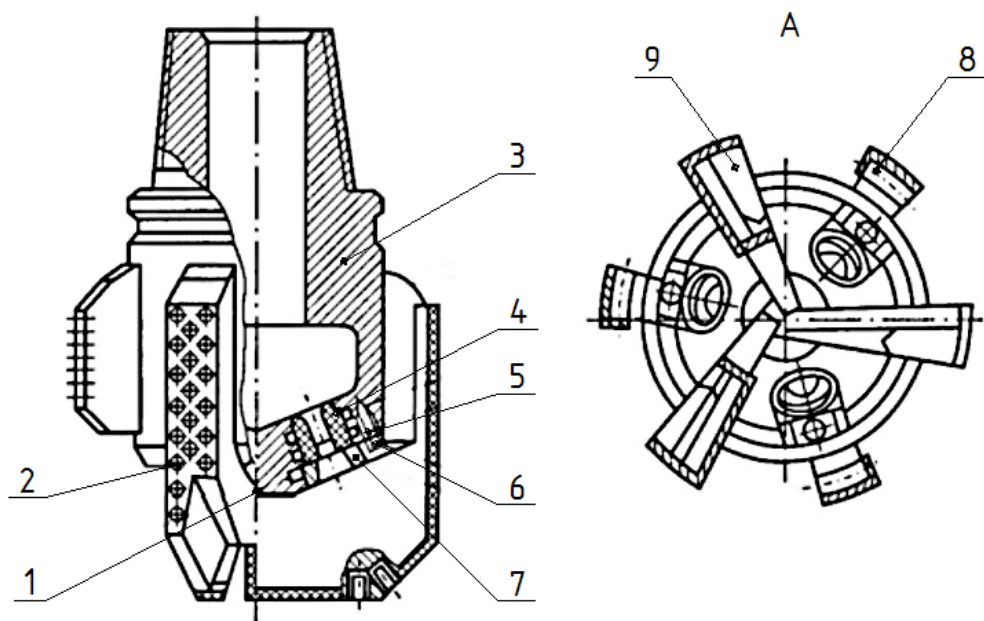
1 – корпус; 2 – резьба для соединения с бурильной колонной; 3 – лопасти; 4 – гидромониторные насадки; 5 – твердосплавные резцы; 6 – калибрующие элементы (резцы).

Рисунок 1.3 – Гидромониторный пикобур конструкции АО «Волковгеология»

Инструмент представляет собой корпус 1 с резьбой 2 для соединения с бурильной колонной и четыре приваренные к корпусу лопасти 3, образующие четырехгранную пику. К уступам лопастей припаяны твердосплавные резцы 5. В корпусе между лопастями выполнены наклонные каналы, оканчивающиеся гидромониторными насадками 4. Резцы 6 на боковой поверхности ребер предназначены для сохранения диаметра скважины. Пикобур бурит скважины диаметром 161 мм, которые затем расширяют до номинального размера.

Все эти инструменты были предназначены для бурения мягких горных пород (I-IV категория по 12-бальной шкале буримости).

Даже небольшое увеличение твердости и абразивности последних приводило к заметному снижению производительности углубления забоя скважины и ускоренному износу рабочих элементов (твердосплавных резцов). Предпринимались попытки создания многолопастных долот с разделением их на группы резцов, размещенных на различных расстояниях до забоя. Это давало возможность отработать на забое группу самых близкорасположенных резцов, а затем пустить в работу следующий, вышерасположенный ярус породаразрушающих элементов (рис. 1.4). Практика показала весьма незначительный положительный общий результат повышение скорости углубления скважины, несмотря на существенное усложнение конструкции долот.



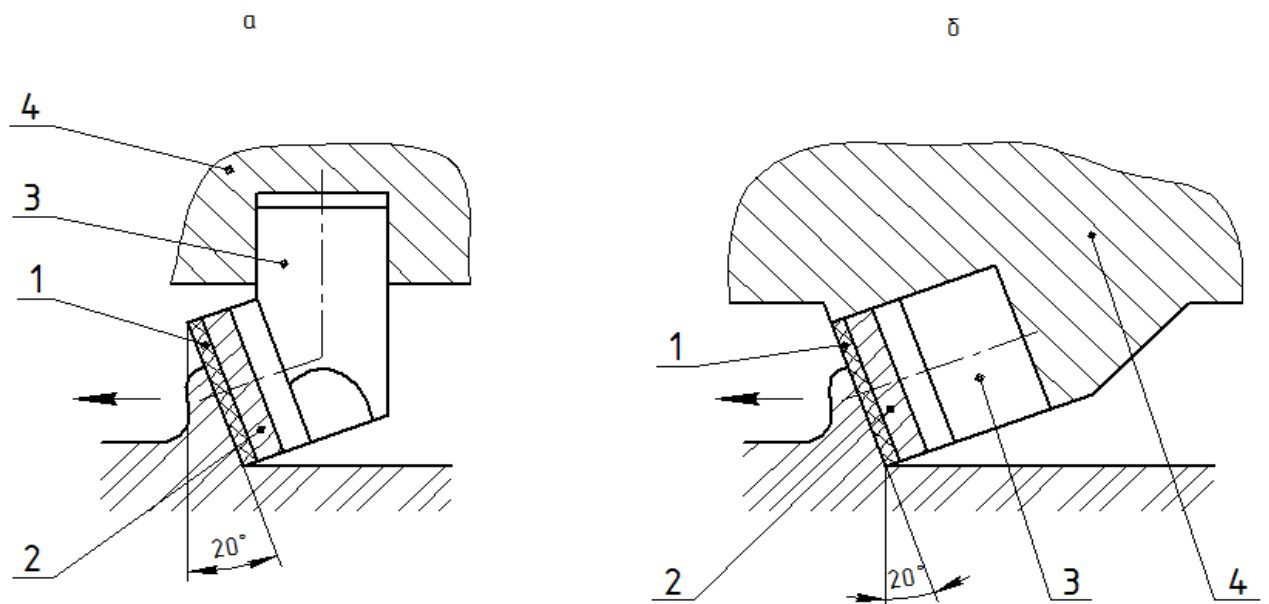
1 – насадка; 2 – штырь; 3 – корпус; 4 – кольцо уплотнительное; 5 – болт; 6 – шайба; 7 – шайба байонетная; 8 – укороченная лопасть; 9 – лопасть.

Рисунок 1.4 – Истирающе-режущее шестилопастное долото (БИР) с гидромониторной промывкой

Кардинальным решением повышения производительности и стойкости долот является разработка в 70-ых годах 20-го века технологии создания алмазно-твердосплавных резцов фирмой «General Electric» [11]. В последующем такие резцы нашли широкое применение при изготовлении и применении лопастных долот PDC. Эффективность последних обуславливается большой режущей способностью тонкого (менее 1 мм) изотропного алмазного слоя, закрепленного на твердосплавной основе резца. Это обеспечивает эффект самозатачивания благодаря опережающему износу твердого сплава и контакт с породой забоя острой алмазной кромкой резца (рис. 1.5). Алмазные пластинки имели круглую форму, стандартизованы и выпускаются диаметрами 8, 10, 13, 13,5 и 19 мм.

С учетом особенности алмазно-твердосплавного вооружения необходимая осевая нагрузка на долото значительно меньше, а механическая скорость бурения во многих случаях такая же. Что касается износостойкости долот PDC, то этот показатель значительно (в несколько раз) превышает аналогичный показатель шарошечных долот. Поэтому долота PDC по суммарной эффективности нашли широкое применение при бурении пород средней твердости, в которых сооружаются, как правило, нефтегазовые и технологические скважины.

Крепление алмазно-твердосплавной пластинки (АТП) приведено на рис. 1.5. Пластина 1, 2 крепится к твердосплавной опоре 3 методом диффузионной сварки. В результате получается элемент вооружения в виде зуба или резца. Для предотвращения разрушения алмазного кристаллического слоя от растягивающих нагрузок, которым этот слой плохо сопротивляется, элементы вооружения имеют тупой угол резания ($90^\circ + a$). Причем угол a составляет не менее 20° .



а – алмазно-твердосплавный зубок; б – алмазно-твердосплавный резец. 1 – алмазный поликристаллический слой; 2 – твердосплавная основа; 3 – опора; 4 – лопасть долота.

Рисунок 1.5 – Крепление алмазно-твердосплавной пластинки

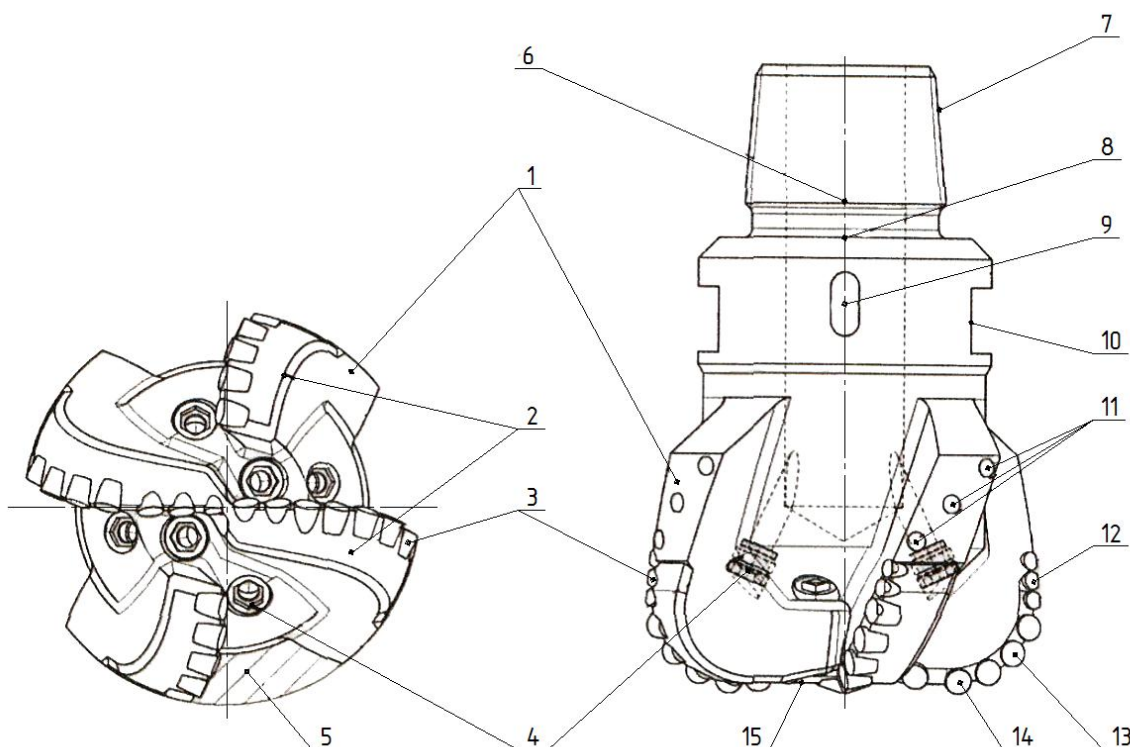
В зависимости от конкретных конструктивных требований алмазно-твердосплавные резцы крепятся к лопастям долота (рис. 1.6). Конструкция алмазно-твердосплавных резцов PDC постоянно совершенствуются. Наиболее распространены резцы семейств GeoMax, SonicMAX, GridMax, TecMax [12]. В зависимости от видов в одном резце выполняется самая большая толщина алмазного слоя (3,85 мм), другой снижает остаточные напряжения, третьи имеют специальный профиль, обеспечивающий более глубокое проникновение в породу забоя и т.д. [13].

Основным ограничением области использования PDC долот является низкая стойкость алмазно-твердосплавных резцов в условиях высоких температур. Установлено, что при температуре на забое более 700 °С резцы начинают разрушаться, поэтому применение долот PDC в твердых абразивных породах ограничено, так как в результате снижения скорости бурения растет температура на забое в результате увеличения работы трения резцов о породу.

Поэтому рациональное распределение потоков бурового раствора по забою скважины имеет исключительно важное значение. Для решения этой задачи используют гидромониторные насадки, определяют их диаметры, и рациональное размещение в торцевой части корпуса долота.

При проектировании PDC долот используется компьютерная программа моделирования корпуса долота и размещения в нем резцов и гидромониторных насадок. В этой работе используется вся информация, поступившая от заказчика:

геологический разрез и характеристика разбуриваемых пород, конструкция скважины, КНБК, наземное оборудование, показатели работы долота (если имеются). Применение компьютерных программ сокращает время подготовки конструкторской документации в 2–3 раза [12, 13].



1 – калибрующая поверхность (gauge pod); 2 – лопасти (blade); 3 – PDC резцы (PDC cutter); 4 – промывочные насадки (nozzles); 5 – межлопастное пространство (junk slot area); 6 – центральный промывочный канал (shank bore); 7 – присоединительная резьба (API Pin Connection); 8 – упорный торец (make Up Face); 9 – паз с серийным номером (slot with serial number); 10 – паз под доску отворота (breaker slot); 11 – калибрующие вставки PDC (gauge insert); 12 – калибрующие (шлифованные) PDC резцы (gauge cutter); 13 – плечо (shoulder); 14 – торцевая область (nose); 15 – внутренний конус (cone).

Рисунок 1.6 – Конструктивная схема PDC долота

1.2 Конструкция лопастных долот, обеспечивающая непрерывный процесс бурения до полного износа рабочих элементов

1.2.1 Лопастные долота с твердосплавным вооружением

Проблема «зависания» долота, изложенная в 1.3 и снижающая производительность бурения, решена в результате теоретических и практических исследований сотрудников КазНИТУ имени К.И.Сатпаева. Ее основные результаты подробно изложены в работе [13] и кратко сводятся к следующему.

При воздействии на забой вращающегося лопастного долота происходит перераспределение осевой нагрузки на размещенные на лопасти резцы в соответствии со следующей зависимостью (рис. 1.1):

$$P = h \left(\frac{E\delta\gamma}{4\pi(i-0,5)(1-\mu^2)} + \frac{Df}{2K} \right), \quad (1.1)$$

где h – глубина снимаемого слоя породы за оборот долота, определяемая по формуле:

$$h = \frac{V_m}{nm}, \quad (1.2)$$

где V_m – скорость бурения;
 n – частота вращения долота;
 m – количество резцов;
 E – модуль упругости породы;
 δ – ширина резца;
 γ – коэффициент, учитывающий стесненные условия резцов при работе в скважине [14]; принимается $\gamma=138$;
 μ – коэффициент Пуассона породы;
 D – диаметр скважины;
 f – коэффициент трения на границе «резец-порода»;
 K – количество резцов i , считая от оси вращения долота.

Схема передачи осевой нагрузки Q лопастям долота приведена на рис. 1.7.

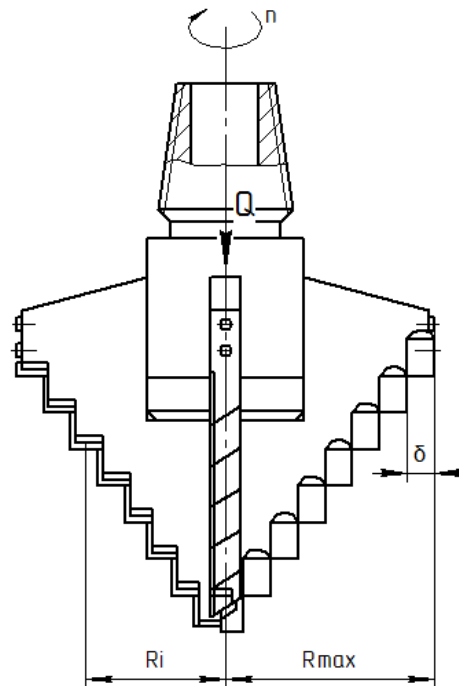


Рисунок 1.7 – Схема передачи осевой нагрузки Q лопастям долота

Анализ формулы (1.1) показывает, что первое слагаемое в скобках зависит от положения резца на лопасти, т.е. от радиуса R_i его вращения, а второе слагаемое от R_i не зависит.

Расчеты, проведенные по методике, изложенной в работе [14], показали, что осевая нагрузка на каждую лопасть долота при разрушении забоя скважины минимальна на периферии лопасти, примыкающей к стенке скважин, а в области околоосевой оси вращения долота достигает огромной величины, возрастая в 8–10 раз (рис. 1.8). Причина заключается в том, что различные точки на лопастях движутся по круговым траекториям, длина которых прямо связана с радиусом вращения этих точек. Самый длинный путь проходят режущие элементы, расположенные у стенки скважины, тогда как на центральной оси их перемещение практически отсутствует. Поскольку лопасть бурового инструмента представляет собой единое целое, глубина внедрения в забой для всех ее резцов оказывается одинаковой вне зависимости от того, где они закреплены. Такое выравнивание достигается благодаря перераспределению осевого усилия: нагрузка возрастает по направлению к оси долота, тем самым уравнивая уменьшение пути, проходимого резцами вблизи центра. Происходит остановка («зависание») пикобура, особенно при встрече твердых пропластков. В результате инструменту нужно некоторое время для разрушения центрального участка забоя. Процесс бурения осложняется, а его технико-экономические показатели снижаются.

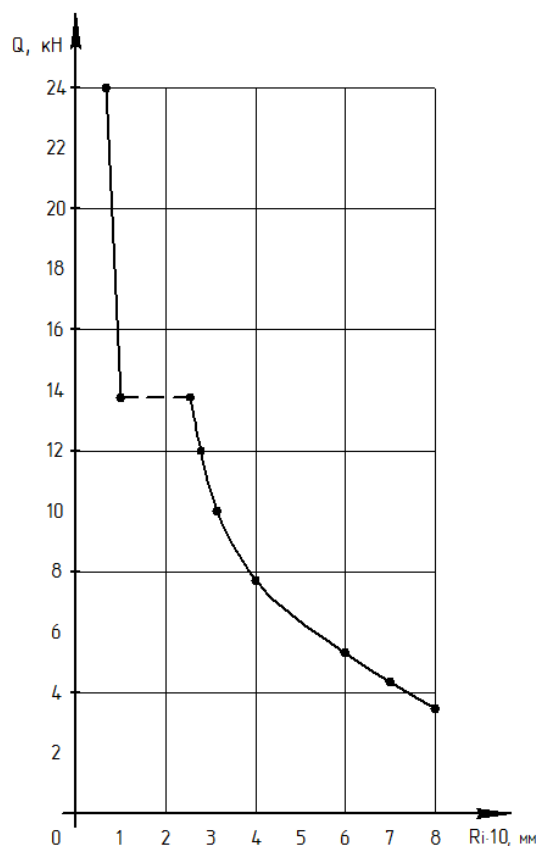
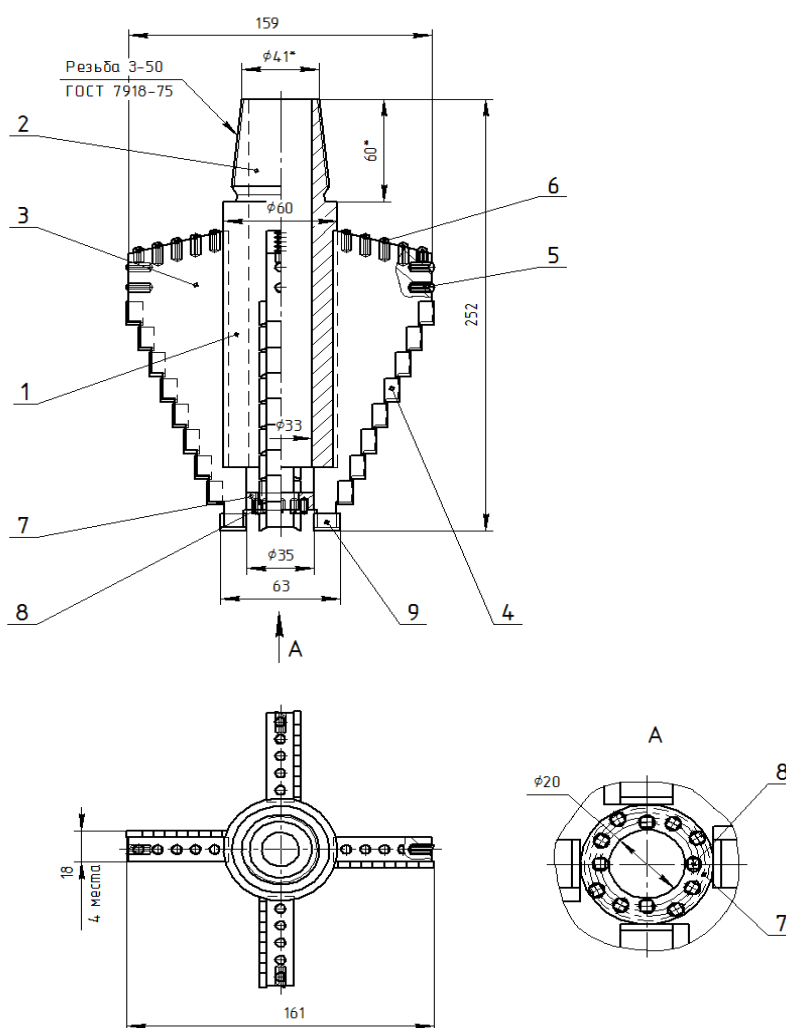


Рисунок 1.8 – Зависимость нагрузки Q , действующей на лопасти пикообразного долота, в зависимости от радиуса вращения R_i твердосплавных резцов

Чрезмерную нагрузку в околоосевой области вращения долота можно устранить простейшим способом – ликвидировать околоосевые ступени лопастей с резцами. Образующийся керн следует размывать струей бурового раствора или механическим керноломом. Такое конструктивное решение позволяет снизить общую нагрузку на забой скважины, уменьшить энергоемкость процесса и повысить стойкость пикообразного долота.

Сотрудники КазНИТУ имени К.И. Сатпаева создали и испытали несколько конструкций лопастных пикобуров, работающих на этом принципе. Наиболее работоспособным оказался запатентованный пикобур ПК (рис. 1.9) выполненный по патенту [15]. Пикобур ПК (рис. 1.9) содержит трубчатый корпус 1 с резьбой 2 для соединения с бурильной колонной (не показана).



1 – корпус; 2 – резьба для соединения с бурильной колонной; 3 – лопасть ступенчатая; 4 – твердосплавный пластинчатый резец; 5 – резец калибрующий; 6 – противоаварийные резцы; 7 – резцы кольца жесткости; 8 – кольцо жесткости; 9 – резцы врубовые.

Рисунок 1.9 – Лопастное долото типа пикобур ПК

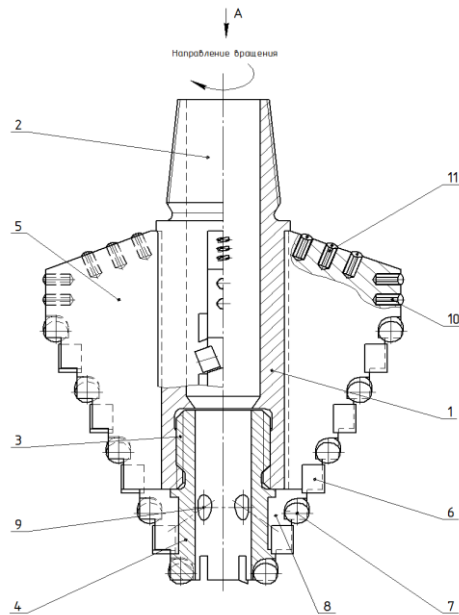
К корпусу приварены четыре ступенчатые лопасти 3, сужающиеся к низу (к забою). Каждая ступень лопасти вооружена пластинчатыми твердосплавными резцами 4. Верхняя, наибольшая по размеру часть лопастей оснащена калибрующими резцами 5, а их тыльная часть – противоаварийным твердосплавным вооружением 6. Нижняя консольная часть ступенчатых лопастей для повышения жесткости конструкции приварена к кольцу 7 с запаянными твердосплавными резцами 8. Как следует из рисунка 1.9, край резцов 9 нижней ступени лопастей находится от оси инструмента на расстоянии $35:2=17,5$ мм. Это дает возможность снять нагрузку с осевой области пикобура, а формирующийся при вращении лопастей целик породы либо размывается (в мягких породах) или разрушается резцами 8 кольца жесткости 7.

Производственные испытания проведены при бурении технологических скважин на урановом месторождении. Глубина пройденных скважин составила 430 м против 280 м, обычно пройденных пикобуром АО «Волковгеология», т.е. стойкость инструмента увеличилась в 1,5 раза. Следует отметить, что скорость бурения верхнего интервала (0–320 м), сложенного мягкими породами, составила 10–12 м/ч с постепенным снижением в интервале (320–400 м), сложенным перемежающимися по твердости породами, до 5 м/час. Бурение самого нижнего интервала, сложенного очень плотными глинами, вызвало еще больше снижение до 3 м/час. Увеличение осевой нагрузки вызвало изгиб нижних врубовых резцов 9 и практически прекращение бурения. Оставшийся нижний интервал (430–650 м) был добурен лопастным долотом, оснащенным PDC резцами.

1.2.2 Конструкция лопастных долот с комбинированным вооружением

Породоразрушающий инструмент для условий бурения технологических скважин в Шу-Сарысуйской урановой провинции разработан нами и запатентован в Республике Казахстан [15] (Приложение В). На рис. 1.10 представлен общий вид предлагаемого комбинированного инструмента, а на рис. 1.11 – вид на пикобур по стрелке А. Кольцевой корпус 1 имеет верхнюю резьбу 2 для соединения с бурильной колонной (не показана) и нижнюю резьбу 3 для соединения с кольцевым лопастным пилотом 4. К боковой поверхности корпуса 1 приварены четыре ступенчатые лопасти 5, ступени которых поочередно вооружены твердосплавными резцами 6 и резцами PDC 7. К боковой поверхности пилота 4 также приварены лопасти 8, являющиеся как бы продолжением лопастей 5 корпуса с тенденцией уменьшения их поперечного размера на величину ступени. В корпусе пилота выполнены четыре наклонных канала для прохода бурового раствора между ступенями лопастей, которые в торцевой части имеют четыре твердосплавных резца и такое же количество резцов PDC. В соответствии с особенностями геологического разреза, когда в верхнем его интервале залегают мягкие породы, их бурение осуществляется твердосплавными резцами. Поэтому кромки твердосплавных резцов должны располагаться ближе к забою скважины на некотором расстоянии по отношению к кромкам резцов PDC (рис. 1.12). На ступенчатых лопастях в месте их наибольшего поперечного размера установлены калибрующие элементы 10, служащие для сохранения диаметра скважины на полную

ее глубину. Для повышения износостойкости элементы 11 выполнены из сверхтвёрдого композиционного материала. Для облегчения ликвидаций осложнений при бурении (например, заклинивание инструмента (рис. 1.10)) тыльная часть лопастей снабжена противоаварийным твердосплавным вооружением 11.



1 – трубчатый корпус; 2 – резьба для соединения с бурильной колонной;
3 – резьба для соединения с пилотом; 4 – пилот кольцевой; 5 – лопасть ступенчатая; 6 – твердосплавный резец; 7 – резец PDC; 8 – ступенчатая лопасть пилота; 9 – наклонные каналы для прохода бурового раствора; 10 – калибрующие резцы; 11 – противоаварийное вооружение.

Рисунок 1.10 – Лопастной пикобур с комбинированным вооружением

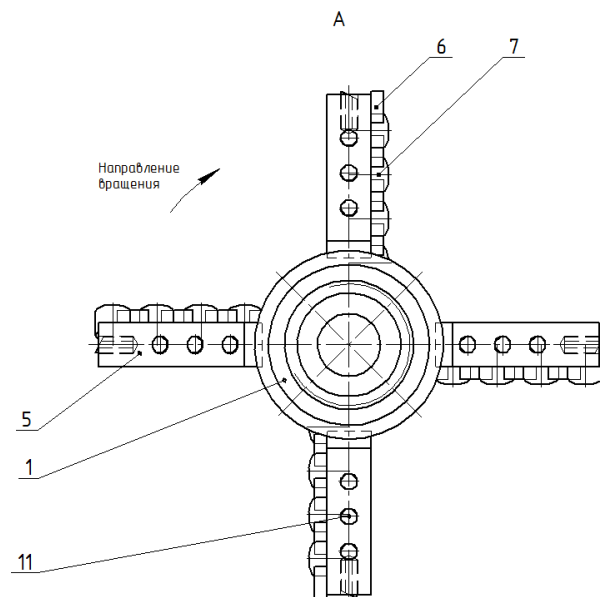


Рисунок 1.11 – Лопастной пикобур с комбинированным вооружением

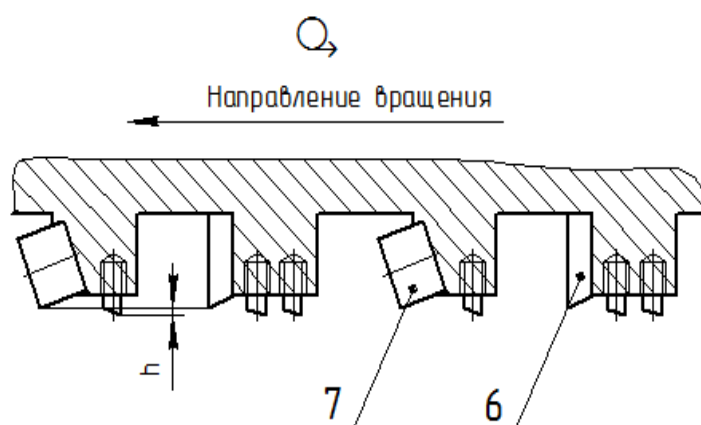
Особенность технологии бурения предлагаемого комбинированного пикобура (рис. 1.10) заключается в том, что в начале интервала бурения мягких пород (рис. 1.12) поперечный размер площадки притупления твердосплавного резца равен b_n (начальное, заводское притупление). При бурении даже мягких пород размер притупления резца вследствие абразивного износа, тем не менее, увеличивается и становится равным b_k при встрече более твердых пород (рис. 1.13). Из треугольников ОДЕ и ОМК можно определить высоту h ($h = MD$), которая равна:

$$h = (b_k - b_n) \tan \alpha \quad (1.3)$$

где α – угол приострения твердосплавного резца.

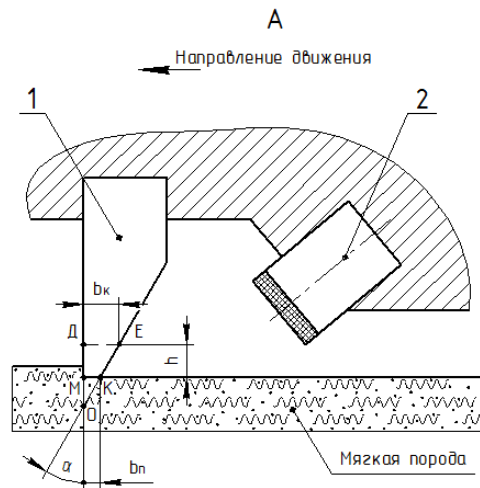
Именно размер h является первоначальной величиной превышения кромок твердосплавных резцов над резцами PDC на торце пикобура перед началом бурения скважины. Величина h зависит от интенсивности износа при бурении скважины в верхней части разреза, мощности последнего, величины падения механической скорости бурения при использовании твердосплавного вооружения пикобура и в этой связи принятие решения перейти на PDC – вооружение долота. Для сооружения скважин на конкретном урановом месторождении (Буденовское, Инкай и др.) величина h определяется с требуемой точностью достаточно просто экспериментально путем многократного измерения заводской величины b_n и полученной b_k после использования пикобура в верхней части разреза.

После того как вследствие износа кромки лезвий твердосплавного резца и резца PDC будут находиться в одной плоскости, начнется интенсивное воздействие PDC резцов на забой, поэтому углубление скважины вплоть до запроектированной глубины будет происходить за счет работы этих рабочих элементов. Подъем бурильной колонны на поверхность происходит только после бурения скважины до проектной глубины.

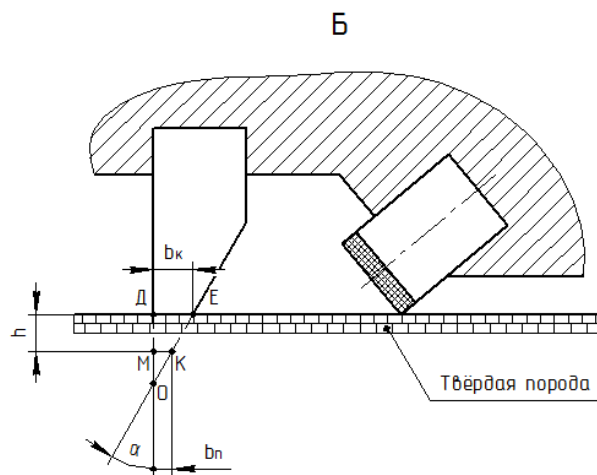


6 – твердосплавный резец; 7 – резец PDC.

Рисунок 1.12 – Развертка по среднему диаметру торца пилота



Начало бурения интервала мягкой породы



Начало бурения интервала твердой породы

Износ твердосплавного резца на высоту h ; торец твердосплавного резца и кромка резца PDC находятся в одной плоскости 1 – твердосплавный резец; 2 – резец PDC.

Рисунок 1.13 – Принципиальная схема работы комбинированного вооружения лопастного пикобура при сооружении технологической скважин.

Кроме того, пилотная часть выполнена разъемной по отношению к корпусу с лопастями. Известно, что чем ближе к оси вращения находятся рабочие элементы, тем большую нагрузку они испытывают, а, следовательно, быстрее изнашиваются в сравнении с вооружением ступенчатых лопастей корпуса. Замена изношенного пилота на новый позволяет полностью отработать все вооружение пикобура, что приводит к удешевлению его использования.

Таким образом, использование комбинированного лопастного пикобура с комбинированным вооружением позволяет в наибольшей мере использовать по-

ложительные стороны твердосплавного и PDC вооружения и бурить технологические скважины за один рейс на полную глубину (до 700–800 м), что повышает эффективность буровых работ.

1.3 Постановка задач исследования

Практика использования пикобуров в АО «Волковгеология» в различных геологических условиях показывает их высокую эффективность при бурении мягких горных пород. При встрече более твердых пропластков наблюдалось так называемое явление «зависания» долота. В этом случае углубка забоя на некоторое время приостанавливается, затем бурение продолжается до следующей остановки инструмента.

Визуальный осмотр использованных пикобуров показал, что износ вооружения на лопастях инструмента происходит неравномерно в зависимости от расстояния до оси вращения рассматриваемого резца. В околоосевой области износ максимален, убывая с увеличением этого расстояния и минимален на периферии лопастей (у стенок скважины). Было также замечено, что явление «зависания» лопастного пикобура связано с износом его пирамидальной осевой части.

Анализ результатов производственных испытаний лопастных долот с твердосплавным вооружением показал, что использование их при бурении более твердых пород нижней части разреза неэффективно: производительность снижается в среднем до 1–3 м/час, а стойкость инструмента падает до 50–80 м проходки.

С появлением лопастных долот, оснащенных резцами PDC, появилась реальная возможность значительно повысить производительность бурения в более твердых породах нижнего интервала геологического разреза и заменить ранее применявшиеся инструменты с твердосплавными резцами. Несмотря на достаточно высокую стоимость PDC инструментов, их применение оправдано благодаря значительному сокращению времени сооружения геотехнологических скважин.

В настоящее время на объектах, связанных с бурением геотехнологических скважин, по экономическим соображениям применяется следующая смешанная технология их сооружения:

- первая геологическая пачка (мощность от 0 до 350–400 м) легко буримых пород бурится пикобурами с твердосплавным вооружением;
- вторая геологическая пачка мощностью от 400 м до 700–800 м (до проектной глубины) более труднобуримых пород проходится лопастными долотами, оснащенными резцами PDC.

Границей между пачками является, как правило, пласт плотных глин.

Смешанная технология сооружения технологических скважин позволяет с одной стороны, выявить максимальные возможности лопастных долот с твердосплавным вооружением, эффективно бурить мягкие породы, а с другой стороны – обеспечить значительное повышение производительности и стойкости инструмента в более твердых породах. Последнее с лихвой компенсируется высокой

стоимостью лопастных PDC долот. Вместе с тем, основным недостатком такой технологии – значительное время спускоподъемные операции, т.е. время на извлечение пикобуров с отработанными твердосплавными резцами и спуск лопастного PDC долота для продолжения бурения до проектной глубины скважины.

Отдельным фактором, определяющим необходимость усовершенствования PDC резцов, является высокая трещиноватость пород в нижней части геологического разреза. Наличие развитой системы естественных трещин приводит к значительным потерям промывочной жидкости, что влечет за собой ухудшение гидравлического режима на забое. В условиях недостаточной очистки забоя от шлама, затрудненного охлаждения и смазки режущих элементов, на резцах возникают зоны локального перегрева. Даже при сохранении геометрической целостности режущей кромки перегрев негативно сказывается на стойкости материала и ускоряет его термическое разрушение.

Кроме того, трещиноватость породы приводит к резкому возрастанию динамических нагрузок на долото. Разрушение забоя в таких условиях сопровождается чередованием резкого входа и выхода резцов из трещиноватых фрагментов, что вызывает колебательные движения инструмента, усиливает вибрации и способствует усталостному износу элементов вооружения. В особенности это касается PDC резцов, которые чувствительны к динамическим нагрузкам вне оси симметрии и неравномерному контакту с породой.

Таким образом, эксплуатация стандартных PDC резцов в трещиноватых интервалах геологического разреза сопровождается одновременно термическими и механическими перегрузками, что ограничивает их ресурс и снижает эффективность бурения. В этих условиях совершенствование конструкции и состава PDC резцов становится необходимым направлением, позволяющим адаптировать инструмент к особенностям реальных геолого-технических условий.

С учетом геолого-технических условий бурения, характеризующихся литологически неоднородными и трещиноватыми породами, а также необходимостью минимизировать время на спуско-подъемные операции, к буровому долоту предъявляются следующие требования:

1. Обеспечивать эффективное разрушение пород различной твердости без резкого падения механической скорости бурения при переходе между литологически контрастными интервалами.

2. Исключать или значительно снижать вероятность возникновения явления «зависания» долота при прохождении плотных прослоев.

3. Сочетать положительные качества твердосплавных резцов (их дешевизну) и PDC резцов (их высокую разрушающую способность) причем тот или иной тип резцов должен эффективно применяться в зависимости от свойств буримых пород.

4. Демонстрировать устойчивую работу в условиях развитой трещиноватости пород, включая сопротивление к повышенным вибрациям и переменным динамическим нагрузкам.

5. Обеспечивать равномерный износ вооружения по всей ширине лопастей для увеличения ресурса долота и сохранения диаметра скважины до достижения проектной глубины (750–850 м).

6. Сохранять режущую способность при недостаточном охлаждении, вызванном потерями промывочной жидкости в трещиноватых зонах, и противостоять локальному перегреву.

7. Максимально увеличивать проходку на одно долото, снижая потребность в спуско-подъемных операциях и тем самым сокращая общее время бурения технологических скважин.

Улучшение PDC резцов должно идти в двух направлениях: подбор композиции спеченной матрицы для повышения термостойкости и разработка оптимизированной формы лезвия с учетом гидродинамики среза и отвода шлама. Такое сочетание позволит не только продлить работу без замены инструмента, но и повысить среднюю механическую скорость бурения.

Переход к исследованиям по введению в состав композитных алмазосодержащих матриц микропорошков CrB_2 и применению плазменно-искрового спекания как раз направлен на решение этих задач. В следующем разделе подробно рассматриваются методика изготовления таких композитов и результаты их испытаний в условиях бурения прочных и абразивных пород.

Диссертационная работа направлена на комплексные исследования влияния добавки микропорошка CrB_2 (в количестве 4 и 10 % (по массе)) на структуру и эксплуатационные свойства композитов $\text{C}_{\text{алмаз}}-(\text{WC}-\text{Co})$, сформированных методом плазменного-искрового спекания в интервале температуры 20–1350 °С при давлении 30 МПа, и создание композиционных алмазосодержащих материалов с высокими эксплуатационными характеристиками, разработка эффективного породоразрушающего инструмента и проведение его испытаний в условиях бурения прочных и абразивных горных пород (рис. 1.14).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ износостойкости КАМ и породоразрушающих инструментов, изготовленных на их основе.

2. Сформировать методом плазменно-искрового спекания экспериментальные образцы твердосплавных матриц и КАМ.

3. Исследовать морфологию исходных материалов и алмазосодержащих смесей в исходном состоянии для спекания образцов КАМ.

4. Исследовать структуру спеченных образцов КАМ.

5. Исследовать влияние добавки CrB_2 в интервале от 0 до 10% на изменение нанотвердости H , модуля упругости E в различных фазах спеченных образцов твердосплавных матриц.

6. Исследовать изменения скорости изнашивания спеченных образцов КАМ в зависимости от их состава.

7. Исследовать морфологию поверхностей трения образцов КАМ после проведения теста на износостойкость.

8. Выполнить фрактографический анализ спеченных образцов КАМ.

9. Изготовить экспериментальную партию инструмента, оснащенного вставками из сформированных КАМ.

10. Провести стендовые испытания разработанных инструментов при бурении гранита и подготовить методические материалы для применения новых инструментов в промышленной практике.



Рисунок 1.14 – Физико-механические свойства КАМ, на улучшение которых направлены исследования

Выводы по разделу 1

1. Проведен анализ существующих конструкций лопастных долот, показавший, что основным достоинством лопастных долот с твердосплавным вооружением является низкая стоимость инструментов, а главным недостатком – достаточно высокая скорость бурения скважины сохраняется лишь в мягких породах (I-IV категория по 12-бальной шкале). С дальнейшим увеличением прочностных показателей пород скорость бурения и стойкость инструмента значительно снижаются.

2. Основным достоинством лопастных долот с PDC вооружением является расширение области эффективного применения на породы средней твердости (V-VI категории) и чрезвычайно высокая стойкость этих инструментов, недостаток – высокая стоимость PDC долот, связанная со сложностью технологии изготовления PDC резцов.

3. Установлено, что основная причина эффекта «зависания» пикобуров – концентрированная осевая нагрузка на центральных резцах и накопление керна вблизи оси вращения, что нарушает равномерность углубки и требует дополнительных конструктивных мероприятий.

4. Выяснение причин «зависания» лопастного долота позволило разработать лопасть пикобур с твердосплавным вооружением, у которого в околоосевой области вращения отсутствуют режущие элементы. В результате появилось возможность более рационально распределить осевую нагрузку на лопасти долота. Испытания нового инструмента показали, более высокую проходку (на 30–40%) в сравнении с применяющимися лопастными пикобурами с твердосплавным вооружением.

5. Если геологический разрез скважины представляют перемежающиеся по твердости породы (от мягких до пород средней твердости), эффективны лопастные долота с комбинированным вооружением, которые позволяют более экономически эффективно использовать достоинства каждого вооружения (твердосплавные и PDC резцы).

6. Разработан лопасть пикобур с комбинированным твердосплавным и PDC вооружением для применения при разведке и добыче уранового сырья. При этом учтена особенность геологического разреза урановых месторождений: с поверхности до глубины 300–350 м залегают мягкие породы, в которых при бурении используется твердосплавное вооружение пикобура, а на глубинах ниже – до проектной глубины скважины, где залегают более твердые породы, применяется тот же пикобур с PDC вооружением и композитными алмазосодержащими элементами.

7. По результатам анализа современных конструкций лопастных долот и их практического применения в литологически неоднородных и трещиноватых разрезах можно сделать вывод, что стандартные PDC резцы, несмотря на изначально высокую режущую способность и износостойкость в однородных условиях, в реальных полевых режимах работают недостаточно эффективно. При смене нагрузок на границе мягких и плотных слоев они демонстрируют повышенный износ и склонность к локальному перегреву в трещиноватых зонах из-за потерь промывочной жидкости, что ведет к снижению скорости бурения и необходимости частой замены инструмента. Более того, стандартная геометрия PDC элементов не учитывает динамические удары при прохождении трещиноватых пород, что дополнительно уменьшает их ресурс и надежность работы. В совокупности эти факторы свидетельствуют о необходимости усовершенствовать PDC резцы для повышения их адаптивности к сложным геолого-техническим условиям.

8. Разработка композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ) на основе матрицы системы $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$, модифицированной микродисперсным порошком CrV_2 и полученной методом плазменно-искрового спекания, открывает возможности для создания принципиально нового поколения породоразрушающего инструмента.

9. Сформулированы требования, которым должны отвечать буровые долота для успешного бурения скважин в условиях бурения литологически неоднородных и трещиноватых разрезов.

2 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ИСКРОВОГО СПЕКАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время основные объемы бурения скважин различного назначения ведется породоразрушающими инструментами, оснащенными PDC резцами [16–20]. Механические и эксплуатационные свойства таких инструментов зависят от физико-механических и режущих свойств композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ). КАМ системы $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$ используются в буровых инструментах [21, 22] в качестве режущих материалов с высокими механическими (твердостью, упругостью, прочностью, износостойкостью) и физическими (плотностью, теплопроводностью) свойствами [23, 24] при бурении в горных породах мягкой и средней твердости. КАМ состоят из алмазных зерен, фаз карбида вольфрама (WC) и кобальта (Co), либо сплавов на их основе и упрочняющей фазы в виде боридов, нитридов, карбидов [25] и т.д.

Спеченные КАМ обладают свойствами, существенно отличными от свойств каждого отдельно взятого компонента, входящего в их состав, и, в то же время, частично обладая свойствами металла (например, пластичностью) и керамики (например, высокими твердостью, упругостью и термостойкостью). Эти свойства зависят от фазового состава, микроструктуры и морфологии, которые так же зависят от свойств их составляющих, способов и технологических режимов спекания [26–29]. Некоторые композиты $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$ обладают такими механическими и эксплуатационными свойствами, которые недостижимы в традиционных материалах [30, 31].

Однако в процессе бурения прочных и абразивных горных пород твердосплавная матрица подвергается сильному абразивному, усталостному и адгезионному изнашиванию [32], что ограничивает практическое применение КАМ и снижает ресурс их эксплуатации. При этом на рабочей поверхности КАМ протекают физико-химические процессы [33, 34], которые могут привести к необратимым изменениям в микроструктуре твердосплавной матрицы [35, 36], резкому уменьшению ее твердости и модуля упругости [37] и, как следствие, к интенсивному изнашиванию инструмента. Кроме того, из-за слабой адгезии между алмазными зернами и матрицей они целиком могут выпадать из твердосплавной матрицы во время работы КАМ [38, 39], что дополнительно снижает износостойкость бурового инструмента. Следует отметить, что графитизация поверхности алмазных зерен [40, 41] и интенсивный рост карбидных зерен [42], происходящие при спекании рассматриваемых КАМ, также ухудшают их механические и эксплуатационные свойства. К недостаткам рассматриваемых КАМ следует еще отнести хрупкость твердосплавной матрицы [43], что может привести к их разрушению при бурении прочных и абразивных горных пород. Поэтому улучшение прочности сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей, повышение прочности, надежности и износостойкости композитов $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$ является важной задачей науки и техники, поскольку это значительно расширяет область их применения.

Существует несколько возможных решений проблемы повышения указанных выше свойств рассматриваемых композитов и снижения их стоимости. Первое – применение метода плазменно-искрового спекания – ПИС (spark plasma sintering – SPS), который является эффективным методом высокоскоростного горячего прессования [44]. Метод ПИС позволяет получать композиты с размером зерен, близким к размеру зерен исходного порошка [45] и повышенными механическими свойствами [46, 47]. Сущность метода ПИС заключается в высокоскоростном нагреве смеси порошков в графитовой пресс-форме за счет пропускания миллисекундных импульсов тока большой мощности в вакууме в условиях приложения давления. Высокая скорость нагрева позволяет значительно уменьшить продолжительность спекания и, как следствие, предотвратить графитизацию алмазных зерен и ограничить скорость роста зерен, а вакуумная среда препятствует окислению исходных компонентов.

Второе – добавление в состав КАМ определенных соединений переходных металлов (боридов, карбидов, нитридов, оксидов), которые являются ингибиторами зерна основной фазы WC при спекании [48, 49].

Использование КАМ системы $C_{алмаз}-(WC-Co)$ в породоразрушающих инструментах для бурения прочных и абразивных горных пород, работающих при больших динамических нагрузках и контактных температурах, требуют изучение структурообразования в процессе спекания, их свойств, в частности, относительной плотности, пределов прочности при изгибе и сжатии, твердости, модуля упругости, вязкости разрушения и износостойкости. Добавление ультрамелкого порошка WC к композиту WC–10%Co (здесь и далее состав композитов представлен в масс. %) оказывает положительное влияние на его твердость, вязкость разрушения и износостойкость [50]. В исследовании [51] показано, что увеличение содержания Cr_3C_2 и WC в составе композита WC–6Co привело к уменьшению зерна с одновременным повышением его твердости. Для дальнейшего улучшения механических свойств рассматриваемых КАМ было проведено оптимизацию содержания углерода [52–54] и кобальта [55–57] в твердосплавной матрице. Размер структурных составляющих твердосплавной матрицы (особенно размер зерна WC) рассматриваемых КАМ играет важную роль в формировании их физико-механических свойств. На сегодняшний день существует множество доказательств того, что большой размер зерна (более 2 мкм) является причиной спонтанных микротрещин, плохих механических свойств, в частности низкой износостойкости [58, 59]. В связи с этим ведутся работы по снижению размера зерна в матрице композиционных материалов до субмикронного или нанометрового уровня [60]. Обнаружено, что добавление наноксида алюминия (Al_2O_3) в количестве 0,5 % в состав композита WC–8Co, спекенного методом порошковой металлургии, обеспечило уменьшение зерна WC с одновременным увеличением его твердости и вязкости разрушения [61]. В работах [62, 63] показано, что значения твердости, вязкости разрушения и прочности наноструктурных композитов WC–Co значительно превышают аналогичные показатели микроструктур-

ных композитов. Такие подходы обеспечивают значительный прирост прочностных свойств. Однако методы формирования с использованием нанопорошков неизбежно ведут к увеличению стоимости композитов.

Информация об испытаниях на механические и трибологические свойства композитов $C_{\text{алмаз}}-(WC-6\%Co)$ с добавками микропорошка CrB_2 , сформированных методом ПИС весьма ограничена. Исключением является немногочисленные публикации по влиянию добавки диборида хрома CrB_2 на механические и трибологические свойства композитов системы $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$ при шлифовании песчаника и гранита на специальном стенде при нагрузке 50 кг и скорости вращения 4 м/с [64–68]. Также имеются некоторые сведения об износостойкости КАМ на основе многокомпонентных матриц, которые демонстрируют достаточно низкие коэффициенты трения ($\mu = 0,14-0,23$) [69, 70] и коэффициент износа ($k = 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$) [71, 72].

Тем не менее, эти значения требуют дальнейших уточнений, а также специальных исследований влияния состава КАМ, изготовленных методом ПИС, на износостойкость породоразрушающих инструментов в процессе бурения прочной горной породы. Из вышеприведенного следует, что исследование повышения износостойкости рассматриваемых КАМ является важной научно-технической проблемой, от решения которой зависит разработка эффективных буровых инструментов с высокими эксплуатационными свойствами. Поэтому необходимо для композитов $C_{\text{алмаз}}-(WC-6\%Co)-CrB_2$ и породоразрушающих инструментов, изготовленных на их основе, провести комплексные исследования структуры и эксплуатационных свойств после их работы.

Разработка композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ), расширение областей их использования требует глубоких знаний о сущности физико-химических процессов, происходящих при их формировании. Структура и свойства КАМ на основе твердосплавных матриц из порошков карбида вольфрама и кобальта зависят от свойств и геометрических характеристик алмазов и аналогичных свойств исходных порошков матрицы, а также способов и технологических режимов их спекания [73]. Марка (прочность и термостойкость) алмазов для изготовления КАМ выбирается в зависимости от функционального назначения инструментов. Свойства КАМ и разработанных инструментов на их основе еще зависят и от величины и формы алмазных зерен, их концентрации. Выбор концентрации алмазов, как и выбор их марки, зависит от требований, предъявляемых к КАМ и инструментам на их основе. В данной главе изложены методики для приготовления алмазосодержащих смесей, методы контроля их качества, методы спекания КАМ, а также оригинальные методологические положения исследований.

2.1 Исходные материалы и приготовление алмазосодержащих смесей для спекания образцов КАМ

Образцы твердосплавных матриц формировали из смесей, содержащих порошки карбида вольфрама (WC), кобальта (Co) и диборида хрома (CrB_2), а образцы композиционных алмазосодержащих материалов – из смесей порошков

для образцов твердосплавных матриц с добавлением алмазного порошка. Для приготовления смесей с целью формирования методом плазменно-искрового спекания (ПИС) образцов твердосплавных матриц и КАМ диаметром 10 мм и толщиной 5 мм использовали порошки алмаза (CVD-алмазы, De Beers, South Africa) зернистостью 500/400 (средний размер зерна (0,450 мкм), карбида вольфрама марки DWC (Украина) со средним размером частиц порошка 2,0–8,0 мкм, кобальта марки ПК-1у (ГОСТ 9721–79) со средним размером частиц порошка 2,0–3,0 мкм и диборида хрома (70,62 % Cr и 29,38 % B) со средним размером частиц 5,0–7,0 мкм (Украина). Размол порошка карбида вольфрама проводилось в шаровой вращающейся мельнице марки «WiseMix SBML» (Корея) в стальном цилиндрическом барабане, футерованный твердым сплавом, с использованием твердосплавных шаров, диаметр которых составлял от 0,4 мм до 0,6 мм. Геометрические характеристики барабана: внутренний диаметр $D_{\text{внутр}}$ – 0,06 м, длина $L_{\text{внутр}}$ – 0,115 м, критическая частота $n_{\text{кр}}$ – 172 об/мин. Среда размола – гексан (C_6H_{14}). После размола смесь размольных тел, порошков и гексана выливается из барабана в металлическую кювету. Отгонка гексана осуществлялась в вакуумном сушильном шкафу марки H-SPT200 при температуре 45 ± 5 °C в течение 120 мин.

После отгонки размольной жидкости размольные тела отделяются от шихты с помощью сита с размер ячеек 300 мкм. Коэффициент заполнения мельницы размольными телами ϕ составлял 0,4 от объема мельницы. Отбор порошковых проб осуществлялся методом квартования по ГОСТ 23148. Порошок делился на четыре части с помощью жесткой крестовины с перпендикулярными ребрами. Порошок из двух противоположных квадрантов объединялся в общую пробу, которую в свою очередь делили на пробу для испытаний и резервную пробу. Резервная проба помещалась в герметично закрытую стеклянную банку.

Гранулометрический состав исходных порошков исследовался на лазерном гранулометре ANALYSETTE 22 MicroTecplus, фирмы Fritsch (Германия) с диапазоном измерений от 100 нм до 2000 мкм. Во встроенную ультразвуковую ванну (объем 500 мл, частота 36 кГц, регулируемая мощность до 60 Вт) подается вода объемом 400 мл. Затем в жидкость добавляется исследуемый образец до оптимального значения световой проницаемости суспензии. После этого порошок диспергируется ультразвуком в течение 1 мин. при максимальной мощности.

Цифровой ультразвуковой генератор оптимально поддерживает установленную мощность на постоянном уровне. Центробежный насос мощностью 100 Вт подает также частицы с большим удельным весом и рассчитан на длительную эксплуатацию. С помощью мощного насоса можно за две секунды один раз полностью перекачать весь объем жидкости.

Измерение за счет этого не зависит от неомогенности пробы. В данном приборе один полупроводниковый лазер с излучением зеленого цвета отвечает за измерение маленьких частиц, в то время как инфракрасный полупроводниковый лазер закрывает диапазон более крупных частиц. Оба лазера путем боковой регулировки оптимально настраиваются – исключительно быстро и независимо друг от друга. Для каждого размера частиц имеется идеальная длина волны и

идеальная комбинация широкого диапазона измерений высокого разрешения и незначительной габаритной площади. Благодаря отклонению длинноволнового лазерного луча прибор обеспечивает максимальную точность измерения даже для крупных частиц в компактном модуле.

При переключении на измерение малых частиц в коротковолновом зеленом лазерном луче, детектор и источник лазерного излучения просто смещаются одновременно – измерительная ячейка остается неподвижной. На каждом измерении с каждого лазера записывается по 100 значений измерения. После этого суспензию продолжали обрабатывать ультразвуком. Для наиболее точного определения размера порошка каждый образец композиционного материала измеряли 5 раз с одноминутным интервалом на диспергирование, суммарное время обработки ультразвуком образца, составляло 5 мин. Составы исходных смесей для спекания образцов твердосплавных матриц (образцы 1–9) и композиционных алмазосодержащих материалов КАМ (образцы 10–12) приведены в табл. 2.1. Порошковые смеси для спекания образцов твердосплавных матриц (образцы 1–9) приготовили следующим образом.

Для образца 1 без добавки CrB_2 порошки Co и WC в требуемом количестве смешивали в спиртовой среде до равномерного смешивания и высушивали в сушильном шкафу.

Порошковые смеси для образцов 2–9 с добавками порошка CrB_2 приготовили другим способом.

Таблица 2.1 – Состав исходных смесей для спекания образцов, % (по массе)

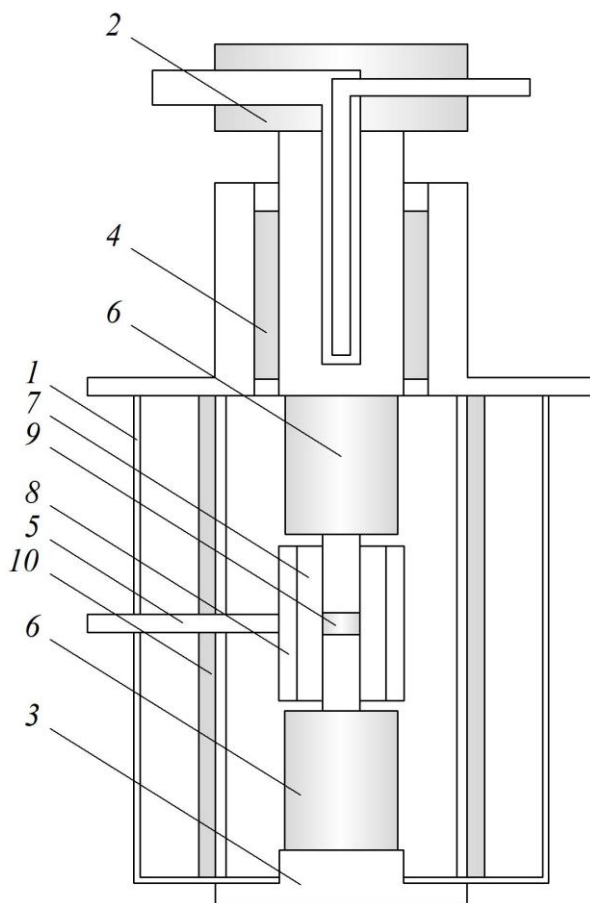
Образец	$\text{C}_{\text{алмаз}}$	WC	Co	CrB_2
1	–	94	6	–
2	–	93,53	5,97	0,5
3	–	93,06	5,96	1,0
4	–	92,59	5,91	1,5
5	–	92,12	5,88	2,0
6	–	90,24	5,76	4,0
7	–	88,36	5,64	6,0
8	–	86,48	5,52	8,0
9	–	84,60	5,4	10,0
10	25	70,5	4,5	–
11	25	66,74	4,26	4,0
12	25	61,1	3,9	10,0

Сначала порошки CrB_2 и Co в требуемом количестве (табл. 2.1) смешивали в спиртовой среде до равномерного смешивания. К полученным смесям добавляли в требуемом количестве порошок WC и перемешивали в спиртовой среде до равномерного смешивания. Затем полученные смеси высушивали в сушильном шкафу. Алмазосодержащие смеси для спекания образцов КАМ 10–12 с раз-

личным содержанием микропорошка CrB_2 готовились следующим образом. Алмазосодержащая смесь для образца КАМ 10 без добавки микропорошка CrB_2 приготовили путем добавления к порошковой смеси для исходного образца твердосплавной матрицы (образец 1, табл. 2.1) алмазного порошка с последующим перемешиванием в спиртовой среде до равномерного смешивания. Затем полученную смесь высушивали в спиртовой среде. Алмазосодержащие смеси для образцов 11 и 12, содержащие соответственно 4 % и 10 % CrB_2 , приготовили на основе смесей для образцов твердосплавных матриц 6 и 9 (табл. 2.1) аналогично смеси для образца КАМ 10.

2.2 Спекание образцов твердосплавных матриц и КАМ

Основными составляющими установки горячего прессования являются камера для горячего вакуумного прессования (рис. 2.1) объемом 7 дм³, источник питания (0-75 кВА, 50 Гц), гидравлический пресс (0-12 т) [74].



1 – корпус; 2, 3 – верхний и нижний токоподводы соответственно; 4 – уплотнитель; 5 – термопара; 6 – пуансоны; 7 – матрица пресс-формы; 8 – обечайка пресс-формы; 9 – зона прессования; 10 – экран.

Рисунок 2.1 – Вакуумная камеры спекания и графитовая пресс-форма установки электроконсолидации

В вакуумной камере между токовводами размещается токопроводная графитовая пресс-форма с компактным порошком. Из камеры откачивается воздух до давления 10^{-3} Па с использованием форвакуумного насоса НВР-4.5Д. Далее запускается источник питания, и начинается нагрев. В качестве мощного источника питания используют сетевой трансформатор ТВК-75, позволяющий получать на вторичной обмотке напряжение порядка 10 В при токе 3–9 кА.

Работа с такими большими токами связана с неизбежным нагревом контактов, находящихся снаружи вакуумной области. Для преодоления этого, кроме принудительного водяного охлаждения наружной части вакуумной камеры, также оснащают водяным охлаждением гибкие токоподводы, которыми установка подключена к вторичной обмотке трансформатора. Управление током, протекающим через форму и шихту, осуществляется блоком регулирования мощности, регулирующим ток в первичной обмотке трансформатора. Это позволяет точно контролировать температуру и скорость нагрева, а также вносить коррективы в процессе спекания.

В интервале от 20 до 1350 °С проводилось плазменно-искровое спекание образцов, состоящих из твердосплавных матриц и композиционного алмазосодержащего материала. Процесс длился 3 минуты в графитовых пресс-формах при давлении 30 МПа. Параметры электрического воздействия: напряжение 5 В, сила тока 5000 А. Нагрев осуществлялся со скоростью 400 °С/мин в вакуумной среде (остаточное давление 6 Па). Контроль температуры выполнялся пирометром модели CHINOIR-АН2, луч которого направлялся на поверхность графитовой оснастки. Рабочие поверхности пресс-формы смазывали нитридом бора для предотвращения взаимодействия между прессуемым материалом и графитом. С помощью плазменно-искрового спекания и возникающего эффекта плазмы реализуется очень быстрый нагрев и малая продолжительность процесса спекания (рис. 2.1). Эта особенность позволяет избежать рекристаллизации зерен и получать равновесное состояние, что открывает возможности для создания новых материалов, в том числе и КАМ с ранее недоступными свойствами с нанокристаллической матрицей.

2.3 Методика изготовления шлифов спеченных образцов

Для анализа микроструктуры и механических свойств спеченных образцов твердосплавных матриц методами оптической и растровой электронной микроскопии изготавливали шлифы диаметром 25 мм толщиной 5 мм. Сформированные методом ПИС образцы твердосплавных матриц подвергались грубой шлифовке с помощью алмазного диска с гальваническим покрытием (1A1-200x20x51 D213 (K50) G) Характеристика алмазного круга для грубой шлифовки спеченных образцов приведена в табл. 2.2. После шлифовки образцы композитов полировали на автоматическом полировальном приборе ASTM Saphir 550 (рис. 2.2) с использованием платиновых и серебряных дисков и алмазной пасты с размером зерен от 3 мкм до 1 мкм до достижения шероховатости R_a менее 0,1 мкм в соответствии с ISO 4287 [75].

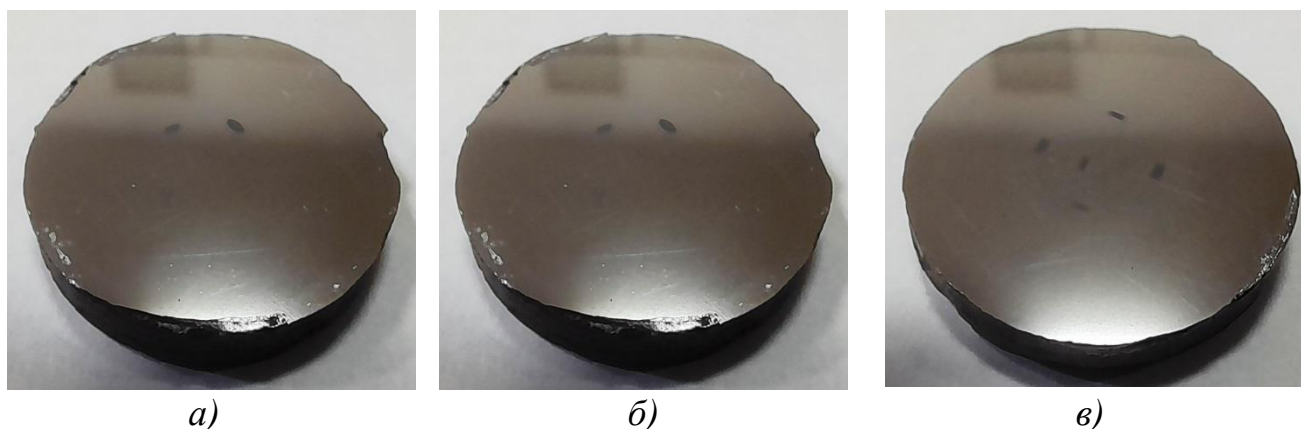
Таблица 2.2 – Параметры шлифовального круга

Тип	A1A
Диаметр (D)	200 мм
Ширина диска (T)	20 мм
Высота алмазосодержащего слоя (X)	5 мм
Диаметр посадочного отверстия (H)	51 мм
Размер алмазного зерна	213 мкм
Концентрация алмазов	K50 ($2,2 \text{ карат/см}^3 = 0,44 \text{ г/см}^3$)



Рисунок 2.2 – Прибор ATM Saphir 550 для полирования шлифованной поверхности спеченных образцов

Снимки полированной поверхности спеченных образцов твердосплавных матриц для исследования эксплуатационных свойств показаны на рис. 2.3. Из этого рисунка видно, что полированная поверхность для всех образцов имеет зеркальный вид, что важно для проведения экспериментальных исследований.



a – 94WC–6Co; *б* – 90,24WC–5,76Co–4CrB₂; *в* – 84,60WC–5,4Co–10CrB₂.

Рисунок 2.3 – Изображения полированной поверхности сформированных методом плазменно-искрового спекания образцов твердосплавных матриц:

2.4 Методика и результаты измерения шероховатости спеченных образцов твердосплавных матриц

Шероховатость поверхности образцов после полировки оценивалась с помощью оптического профилометра Taylor Hobson Talysurf CCI (рис. 2.4). Принцип работы этого прибора основан на сканирующей широкополосной интерферометрии. Прибор позволяет получать трехмерные изображения поверхностей. Следующие параметры поверхности определялись в соответствии с ISO 25178 [75]. Затем образцы были подвергнуты испытаниям.



Рисунок 2.4 – Прибор для измерения шероховатости поверхности спеченных образцов

В табл. 2.3 представлены результаты испытаний на шероховатость сформированных методом ПИС образцов твердосплавных матриц до и после шлифо-

вания на лабораторном шлифовально-полировальном станке. Обработка позволила получить одинаковые значения шероховатости поверхности для исследуемых образцов.

Таблица 2.3 – Результаты измерений шероховатости Ra

Образец	Значения Ra после шлифовки, мкм			Значения Ra после 3 ч и 20 мин полировки диском Silver+ вода	
	Ra	Средняя для стороны	Средняя для образца	Ra , мкм	Средняя для стороны, мкм
94WC–6Co (образец 1)	1,356	1,389	1,454	0,007	0,010
	1,294				
	1,516				
	1,661	1,520		0,010	
	1,399			0,013	
	1,501				
90,24WC–5,76Co–4CrB ₂ (образец 2)	1,259	1,123	1,111	0,008	0,008
				0,010	
				0,008	
84,60WC–5,4Co–10CrB ₂ (образец 3)	1,008	1,128	1,076	0,008	0,008
	1,081			0,010	
	1,294			0,008	

Из табл. 2.3 хорошо видно, что для образцов 90,24WC–5,76Co–4CrB₂ и 84,60WC–5,4Co–10CrB₂ шероховатость поверхности после шлифования и после полирования имеет существенно меньшие значения по сравнению с образцом твердосплавной матрицы 94WC–6Co, сформированных методом плазменно-искрового спекания при одинаковых технологических режимах. Из приведенных результатов стает очевидным, что добавление диборида хрома в состав композита 94WC–6Co оказывает влияние на шероховатость и, как следствие, на механические эксплуатационные свойства.

2.5 Методика исследования морфологии и микроструктуры спеченных образцов методом сканирующей электронной микроскопии

Морфологию и микроструктуру спеченных образцов твердосплавных матриц и композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ) исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью электронного микроскопа TESCAN Mira 3 LMU с пространственным разрешением 1 нм, оборудованным энергодисперсионным микроанализатором OXFORD X-MAX 80 мм² и электронного микроскопа ZEISS EVO 50 XVP (CarlZeiss, Германия). Микроскоп ZEISS EVO 50 XVP оборудован анализатором рентгеновских спектров Ultim Max 100 (Oxford Instruments) и детектором дифракции отраженных электронов HKL CHANNEL 5. Увеличение изменяется в пределах от 5х до 1000000х.

Энергодисперсионный анализатор рентгеновских спектров Ultim Max 100 (Oxford) работает с энергодисперсионным спектрометром Aztec live Automate.

Разрешение детектора составляет 127 эВ на линии Mn K al, 64 эВ, на линии F K al, 56 эВ, на линии C K al и скорость счета 130 000 имп/сек. Количественное определение элементного состава в пробе от бора до урана с чувствительностью до 0,1 мас. % в локальных участках 0,1 мкм². SE-детектор вторичных электронов Эверхарта-Торнли для работы при низком вакууме и получение топограмм катодolumинесценции. Для анализа получали не менее двадцати изображений каждого образца.

Расчеты химического состава осуществляли по методике ZAF-коррекции и программного пакета Magelanes 3.1. Погрешности определения для тяжелых элементов составляли ~ 0,01 мас.% и легких – ~ 0,1 мас.%. В режиме анализа поверхности образцов ускорительное напряжение составляло 30 кВ ($\lambda_{Cu} = 0,1542$ нм). Электронно-микроскопические исследования тонких фольг от спеченных образцов и соответствующие дифракционные картины проводили на трансмиссионном электронном микроскопе ТЭМ-125 (Сумы, Украина) с потенциалом ускорения 125 кВ при разрешении 0,18 нм.

Оценку межплоскостных расстояний по микроэлектронограммам (МЭГ) проводили с использованием внутреннего эталона MgO. Количественный фазовый состав композита рассчитывали методом плотнопрофильного анализа с использованием пакета MAUD. Тонкие фольги от спеченных образцов для исследования микроструктуры получили методом электрополировки в растворе HClO₄+30%HNO₃+H₂O.

Микроструктуру спеченных образцов КАМ также исследовали методом оптической микроскопии с помощью микроскопа Axioscope 5 (фирма-производитель ZEISS, Германия). В программном обеспечении ZenCore для микроскопа реализована функция, позволяющая автоматически делать снимки по таймеру при изменении фокуса, а затем составлять результаты в одно изображение. Такой подход полезен для получения четкого глубокого изображения образцов с помощью стекинга фокусных плоскостей. Таймер настраивался на 200 мс, что позволяет визуально наблюдать изменения в фокусе каждого восторженного изображения. После завершения процесса сбора изображений программное обеспечение автоматически сбрасывает эти снимки в одно, используя технику стекинга. Это может быть сделано путем объединения различных частей изображений, имеющих лучший фокус, для создания одного изображения со значительно повышенной глубиной резкости.

2.6 Методика исследования микроструктуры методом оптической микроскопии

Изучение морфологии исходных компонентов, элементного состава и микроструктуры спеченных образцов твердосплавных матриц и КАМ проводилось на металлографическом оптическом инвертированном микроскопе отраженного света Axio Vert.A1 фирмы Carl Zeiss (Германия).

С помощью фотокамеры изображение, полученное на микроскопе, передается на компьютер, который оснащен системой SIAMS 700, представляющей собой программный продукт, предназначенный для проведения обработки и анализа изображений.

Обработка изображений в программном пакете «SIAMS Photolab» производится в цепочке взаимосвязанных ячеек, содержащих исходное изображение, результаты промежуточных этапов обработки, конечное обработанное изображение и результаты измерений в виде чисел, графиков и гистограмм. После создания цепочки для обработки нового образца по заданному алгоритму достаточно заменить исходное изображение. При этом имеются возможности для визуального контроля и ручной настройки параметров любого этапа обработки. Помимо автоматизированной обработки, система позволяет проводить редактирование изображений в ручном и полуавтоматическом режимах.

Методом оптической микроскопии определена пористость образцов при увеличении $\times 50$, а также, фазовый состав, средний размер зерна и распределение фазы WC по классам зернистости при увеличении $\times 1000$. Для выявления η -фазы использован реактив Мураками, который представляет собой смесь 20 %-ных водных растворов железосинеродистого калия и гидроксида натрия в равных объемах. Травление производилось при комнатной температуре окунанием с выдержкой 2–3 минуты. Аттестация микроструктуры сплавов проведена в соответствии с ГОСТ 9391-80.

Фрактографирование поверхности разрушенных при ударном нагружении спеченных образцов КАМ выполнялось методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN Mira 3 LMU.

2.7 Методика измерения нанотвердости и модуля упругости спеченных образцов

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 [76]. Для каждого образца выполнялось минимум десять вдавливаний с интервалом 10–15 мкм между соседними отпечатками, после чего измеренные значения усреднялись. Погрешность определения глубины отпечатка находилась в пределах $\pm 0,04$ нм, а точность задания нагрузки на индентор – ± 20 –24 мН. Предварительно перед тестированием образцов проводилось испытание на плавленом кварце, который служит эталоном твердости при наноиндентировании, поскольку ему не свойственны масштабный эффект и упрочнение поверхности в результате механической обработки. Полученные данные для плавленого кварца ($E = 73$ ГПа и $H = 9,2$ ГПа) подтвердили надежную калибровку прибора.

Графики, представленные на рис. 2.5, представляют собой карты свойств, определенных методом наноиндентирования. Из этого рисунка видно, что твердость образцов различна. В материале образца 1 наблюдаются участки с самыми

высокими значениями твердости. В образцах 2 и 3 наблюдаются меньшие значения максимальной твердости, чем в образце 1. При этом разброс твердости в структуре образцов 2 и 3 был меньше. В материале образца 1 по сравнению с образцами 2 и 3 также наблюдаются участки с наибольшими значениями модуля упругости. Следует подчеркнуть, что у всех образцов материал матрицы тверже наполнителя (добавки CrB_2).

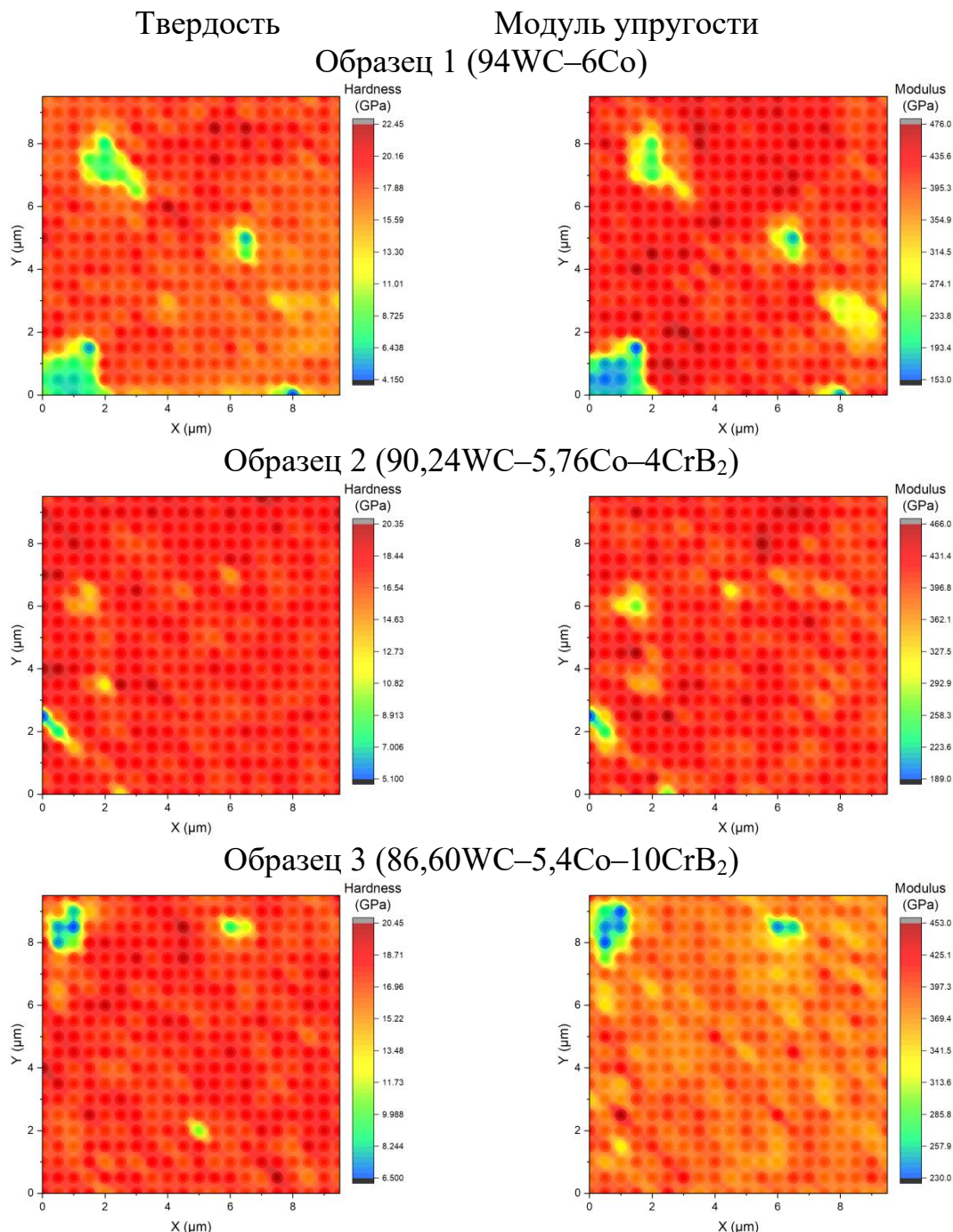


Рисунок 2.5 – Карты свойств спеченных образцов

2.8 Методика определения износостойкости спеченных образцов КАМ

В настоящее время в литературе нет сведений об измерениях, выполненных на коммерческих КАМ на основе твердосплавных матриц с составом, исследованным в представленной работе при одинаковых условиях испытаний. Поэтому исследование износостойкости спеченных образцов КАМ проводили по схеме «цилиндр–вал» путем точения цилиндрического керна коростышевского гранита X категории буримости с использованием испытательного стенда на базе токарно-винторезного станка IA616 (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Стенд для испытания спеченных образцов на износостойкость

Испытания на износостойкость проводили при частоте вращения 400 об/мин, углублении за единичный проход 0,5 мм, поперечной подаче 0,5 мм/об, продольной подачи 0,13 мм/об и нормальной нагрузке 10 Н. Длина режущей части керна становили 200 мм, а его начальный диаметр – 70 мм. Измерение потери веса каждого образца КАМ выполняли после 10 проходов в течение 3300 с (длина одного прохода «длина режущей части керна» – 200 мм, время – 230 с). В качестве охлаждающей жидкости использовали техническую воду.

Скорость износа спеченных образцов КАМ определяли по следующим трибологическим характеристикам.

Скорость износа по массе W_R вычисляли как отношение потери веса образца к пройденному при трении пути. Потерю веса определяли взвешиванием до и после испытаний. Скорость износа по объему W_V находили аналогичным образом, но с учетом плотности материала. Дополнительно рассчитывали удельную скорость износа W_S – для этого потерю объема нормировали сразу на длину пути и на приложенную нормальную нагрузку.

Пройденный путь при трении зависел от диаметра вращающегося керна, частоты вращения шпинделя и длительности испытания. Взвешивание образцов до и после экспериментов проводили на аналитических весах модели AXIS AD 200.

2.9 Методика испытаний алмазных буровых инструментов на износостойкость

Нами были проведены экспериментальные исследования износостойкости разработанных составов КАМ. В качестве изучаемых объектов выбраны буровые алмазные импрегнированные коронки типа БС-04 1 и 2 диаметром 59 мм (внешний диаметр 59 мм, внутренний – 42 мм). Буровая алмазная импрегнированная коронка 1, зготовлена на основе композиционных алмазосодержащих материалов состава $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$, и буровая алмазная импрегнированная коронка 2 – $25C_{\text{алмаз}}-68,62WC-4,38Co-2CrB_2$.

Для приготовления смесей для образцов КАМ с целью формирования методом ПИС использовали порошок алмаза (АС160Т) зернистостью 315/250 (средний размер зерна $\approx 0,297$ мкм), среднезернистый порошок карбида вольфрама (Украина) со средним размером частиц порошка $\approx 2-8$ мкм), кобальта марки ПК-1у (ГОСТ 9721-79) со средним размером порошка $\approx 2-3$ мкм и диборид хрома (Украина) со средним размером порошка 3-8 мкм.

Спекание образцов КАМ осуществляли в графитовых пресс-формах методом ПИС в интервале температуры 20-1350 °С при давлении 30 МПа в течение 3 мин. Электрический ток составлял 5000 А, напряжение – 5 В, скорость нагрева – 400 град/мин. Спекание осуществляли в вакууме (6 Па). Температуру измеряли с помощью пирометра CHINOIR-АН2, сфокусированного на поверхности графитовой пресс-формы. Рабочие поверхности пресс-формы смазывали нитридом бора для предотвращения взаимодействия между прессуемым материалом и графитом. Спеченные образцы КАМ крепили к стальным корпусам алмазных коронок 1 и 2 методом пайки.

Испытания алмазных коронок на износостойкость проводили на специальном стенде, на базе радиально-сверлильного станка 2М57 с мощностью двигателя 13 кВт, оснащенного гидравлической системой подачи и системой промывки скважины, при бурении гранита коростышевского месторождения (Украина) X категории буримости (твердость по штампу 2,37 ГПа, абразивность 43, объединенный показатель буримости 34-51). Бурение осуществляли в блоке гранита на глубину 0,5 м за один проход. Для каждой алмазной коронки проходку осуществляли по четыре прохода, которая в сумме составляла 2 м, что позволяло получить достоверные данные для измерения износа алмазосодержащего слоя. Бурение гранитных блоков размером 100×100×500 мм осуществляли при осевой нагрузке 800, 900, 1000, и 1250 кг при частоте вращения 250, 500, 750 и 1250 об/мин. После каждого цикла режущую часть (алмазосодержащий слой) алмазных импрегнированных коронок промывали этиловым спиртом и взвешивали их на аналитических весах с точностью до 0,01 г. Скорость износа алмазной импрегнированной коронки определяли по формуле [77]:

$$v = \frac{\Delta m}{H}, \quad (2.1)$$

где v – скорость износа (мг/мм), Δm – потеря массы до и после испытаний (мг), H – глубина бурения (мм).

Выводы по разделу 2

1. В ходе экспериментального освоения метода плазменно-искрового спекания (ПИС) подтверждена его исключительная способность формировать КАМ с минимальной пористостью и практически неизменным размером зерен алмаза и WC-фазы. Быстрый прогрев при токах до 5000 А и высокое давление в 30 МПа за счет сокращения времени спекания до 3 мин предотвращают графитизацию алмазного слоя и чрезмерный рост зерен WC, что обеспечивает сохранение высоких механических свойств композита и позволяет получать репродуцируемые образцы с предсказуемой структурой.

2 Введение диборида хрома CrB_2 в матрицу WC–Co продемонстрировало существенное выравнивание микроструктуры: уменьшение разброса размеров зерен, снижение поверхностной шероховатости после полирования и одновременное повышение однородности нанотвердости. Это указывает на роль CrB_2 как эффективного ингибитора зеренного роста и стабилизатора интерфейса «алмаз–матрица», что важно для сопротивления динамическим и термическим нагрузкам в трещиноватых и абразивных средах.

3. Разработанная методика ступенчатого приготовления порошковых смесей – от поочередного смешения CrB_2 и связки Co до введения WC и алмазного порошка, с обязательным дроблением, квартованием и контролем гранулометрического состава – обеспечила высокую однородность шихты. Такая подготовка в сочетании с последовательным контролем состояния суспензии при ультразвуковой дисперсии заложила надежную основу для получения композитов с воспроизводимыми свойствами и четкой корреляцией «состав–микроструктура–свойства».

4. Трибологические испытания по схеме «цилиндр–вал» на коростышевском граните выявили, что образцы с добавкой CrB_2 демонстрировали на 15–25 % более низкую скорость изнашивания по весу и объему по сравнению с базовым композитом WC–6 %Co. Эти данные свидетельствуют об улучшении сопротивления абразивно-усталостному износу благодаря модифицированной структуре матрицы, что прямо указывает на прикладной потенциал разработанных КАМ для изготовления более долговечных PDC резцов.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗНАШИВАНИЯ СПЕЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗРАБОТАННЫХ НА ИХ ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТОВ

Сложные условия бурения требуют от армирования породоразрушающего инструмента не только высокой твердости и прочности, но и стабильной работоспособности при постоянных сменах нагрузок, скоростей и гидродинамических режимов. В реальных скважинах рабочие элементы подвергаются комбинированному действию абразивного трения, ударных и крутильных перегрузок, локального перегрева и потерь охлаждающей жидкости в трещиноватых зонах. В таких условиях ключевым становится понимание не просто абсолютных цифр износа, а выявление закономерностей, определяющих скорость и характер разрушения композитных алмазосодержащих материалов под влиянием различных факторов.

Исследование изнашивания спеченных образцов дает возможность проследить связь между микроструктурой, составом матрицы и динамикой формирования дефектов поверхности – трещин, выкрашивания зерен, образования борозд и каверн. В то же время испытания готовых буровых коронок в условиях, приближенных к промышленным, позволяют оценить, насколько лабораторные характеристики материала транслируются в долговечность и эффективность инструмента в полевых работах. Только комплексный подход, сочетающий модельные трибологические схемы и стендовые буровые испытания, способен дать надежную оценку потенциала новых составов и технологий их получения.

Для разработки высокоэффективных алмазных инструментов для бурения прочных и абразивных горных пород необходима информация об их износостойкости. Однако на современном этапе разработки алмазных буровых инструментов не существует решения задачи о кинетике их изнашивания с полным отражением специфических особенностей композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ), формы и геометрии профиля, а также условий бурения, которые могли бы использовать для технологии изготовления КАМ. Решение такой задачи требует применения математических моделей неоднородных сред: теплопроводности, термоупругости и кинетики изнашивания. В этом разделе приведены примеры результаты исследования при разработке и эксплуатации существующих и созданных композиционных алмазосодержащих материалов на основе твердосплавных матриц с добавлением в их состав диборида хрома, а также инструментов, изготовленных на их основе.

3.1 Закономерности изнашивания образцов КАМ

3.1.1 Спекание образцов КАМ для исследования износостойкости

Для приготовления смесей с целью формирования методом ПИС образцов КАМ диаметром 25 мм и толщиной 5 мм для исследования износостойкости использовали порошки алмаза (CVD-алмазы, De Beers, South Africa) зернистостью 500/400 (средний размер зерна $\approx 0,450$ мкм), карбида вольфрама марки DWC (Украина) со средним размером частиц порошка 2,0–8,0 мкм, кобальта марки ПК-1у (ГОСТ 9721–79) со средним размером частиц порошка 2,0–3,0 мкм и диборида хрома (70,62 % Cr и 29,38 % B) со средним размером частиц 5,0–7,0 мкм (Украина). Составы исходных смесей для спекания образцов КАМ (образцы 1–3) приведены в табл. 3.1. Порошковые смеси для спекания образцов приготовили следующим образом. Для образца КАМ 1 без добавки CrB₂ порошки Co и WC в требуемом количестве смешивали в спиртовой среде до равномерного смешивания. К полученной смеси добавляли в требуемом количестве предварительно смоченный глицерином алмазный порошок и перемешивали в среде спирта до равномерного смешивания. Порошковую смесь для образца 2 с добавками порошка CrB₂ приготовили другим способом.

Сначала порошки CrB₂ и Co в требуемом количестве (табл. 3.1) смешивали в спиртовой среде до равномерного смешивания. К полученной смеси добавляли в требуемом количестве порошок WC и перемешивали в спиртовой среде до равномерного смешивания. Затем к полученной смеси в требуемом количестве добавляли алмазный порошок и перемешивали в среде спирта до равномерного смешивания. Алмазосодержащую смесь для образца 3, содержащего 10 % CrB₂, приготовили аналогичным способом, что и для образца КАМ 2. Спекание исследуемых образцов осуществляли в графитовых пресс-формах методом ПИС в интервале температуры 20–1350 °С при давлении 30 МПа в течение 3 мин. Электрический ток составлял 5000 А, напряжение – 5 В, скорость нагрева – 500 град/мин. Спекание осуществляли в вакууме (6 Па). Рабочие поверхности пресс-формы смазывали нитридом бора для предотвращения взаимодействия между прессуемым материалом и графитом.

Таблица 3.1 – Состав исходных смесей для спекания образцов КАМ (мас. %)

Образец	C _{алмаз}	WC	Co	CrB ₂
1	25	70,5	4,5	–
2	25	66,74	4,26	4,0
3	25	61,1	3,9	10,0

На рис. 3.1 представлены микроскопические изображения образцов КАМ (образцы 1–3), сформированных методом ПИС при температуре 1350 °С и давлении 30 МПа. На их поверхности видны алмазные зерна, выступающие из твердосплавной матрицы, а диаметр спеченных КАМ находится в диапазоне от 24,7 до 24,8 мм, а высота – от 4,8 до 5,0 мм.



a)



б)



в)

a – $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$; *б* – $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$;
в – $25C_{\text{алмаз}}-61,1WC-3,9Co-10CrB_2$.

Рисунок 3.1 – Микроскопические изображения образцов КАМ с различным содержанием добавки микропорошка CrB_2 после их спекания:

При этом алмазные зерна на поверхности образцов 2 и 3 (рис. 3.1, *б*, *в*) по сравнению с образцом 1 (рис. 3.1, *а*) распределены более равномерно.

Из представленных результатов можно сделать вывод, что введение добавки микропорошка CrB_2 в состав КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ активирует процесс спекания и способствует более равномерному распределению алмазных зерен в твердосплавной матрице.

3.1.2 Исследование закономерностей изнашивания образцов КАМ

В настоящее время в литературе нет измерений, выполненных на коммерческих КАМ на основе твердосплавных матриц с составом, исследованном в представленной работе, и при одинаковых условиях испытаний.

Трибологические характеристики спеченных образцов КАМ проводили на по схеме «цилиндр–вал» путем точения цилиндрического керна гранита X категории буримости с использованием испытательного стенда на базе токарно-винторезного станка IA616 (рис. 3.2) при следующем режиме: частота вращения – 400 об/мин, проходка за один проход – 0,5 мм, продольная подача – 0,13 мм/об, поперечная подача – 0,5 мм/об, нормальная нагрузка – 10 Н. Режущая часть керна имела длину 200 мм, а исходный диаметр составлял 70 мм. Потерю массы каждого образца КАМ регистрировали после 3300 секунд испытаний, в течение которых было выполнено 10 проходов. Один проход (соответствует длине режущей части керна – 200 мм) занимал 230 секунд. В качестве охлаждающей жидкости использовали техническую воду.

Состав спеченных образцов КАМ и трибологические характеристики приведены в табл. 3.2.



Рисунок 3.2 – Стенд для испытания спеченных образцов на износостойкость

Таблица 3.2 – Трибологические характеристики образцов КАМ

Образец	Состав, % (по массе)	Скорость износа по весу $W_R, 10^{-5}$ г/м	Скорость износа по объему $W_V, 10^{-12}$ м ³ /с	Удельная скорость износа $W_S, 10^{-13}$ м ³ /(Н·м)
1	25C _{алмаз} –70,5WC–4,5Co	8,92	8,6980	7,16
2	25C _{алмаз} –66,74WC– 4,26Co–4CrB ₂	4,54	3,5717	3,9686
3	25C _{алмаз} –61,1WC– 3,9Co–10CrB ₂	6,44	5,7087	5,3483

Результаты экспериментов показали, что изготовленный образец 1 ($C_{CrB_2} = 0$) в описанных выше технологических режимах характеризуется значениями скорости износа по весу W_R ($8,92 \cdot 10^{-5}$ г/м), скорости износа по объему W_V ($8,6980 \cdot 10^{-12}$ м³/с) и удельной скорости износа W_S ($7,16 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м)).

После введения в состав шихты добавки диборида хрома CrB_2 в количестве 4 %, значения скорости износа по весу W_R , скорости износа по объему W_V и удельной скорости износа W_S уменьшаются (от $8,92 \cdot 10^{-5}$ г/м до $4,54 \cdot 10^{-5}$ г/м, от $8,6980 \cdot 10^{-12}$ м³/с до $3,5717 \cdot 10^{-12}$ м³/с и от $7,16 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м) до $3,9686 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м) соответственно).

Уменьшение износа КАМ $25C_{алмаз}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ по сравнению с КАМ $25C_{алмаз}-70,5WC-4,5Co$ обусловлено формированием мелкозернистой структуры твердосплавной матрицы, увеличением относительной плотности $\rho_{отн}$, увеличением сопротивления материала твердосплавной матрицы упругой H/E и пластической H^3/E^2 деформациям, увеличением пределов прочности на изгиб R_{bm} и сжатие R_{cm} и увеличением вязкости разрушения K_{IC} . В случае дальнейшего увеличения содержания диборида хрома от 4 до 10 % в составе композита наблюдали увеличение значений скорости износа по весу W_R , (от $4,54 \cdot 10^{-5}$ г/м до $6,44 \cdot 10^{-5}$ г/м), скорости износа по объему W_V ($3,5717 \cdot 10^{-12}$ м³/с до $5,7087 \cdot 10^{-12}$ м³/с) и удельной скорости износа W_S (от $3,9686 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м) до $5,3483 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м)).

Увеличение значений скорости износа по весу W_R , скорости износа по объему W_V и удельной скорости износа W_S в образце $25C_{алмаз}-61,1WC-3,9Co-10CrB_2$ по сравнению с образцом $25C_{алмаз}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ обусловлено уменьшением пределов прочности на изгиб R_{bm} и сжатие R_{cm} и вязкости разрушения K_{IC} (рис. 3.20). Таким образом, показано, что зависимости скорости износа по весу W_R , скорости износа по объему W_V и удельной скорости износа W_S имеют максимум при концентрации диборида хрома $C_{CrB_2} = 4$ %.

Следует отметить, что износостойкость спеченного образца КАМ $25C_{алмаз}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$, в описанных выше технологических режимах, в 2 раза превышает износостойкость образца КАМ $25C_{алмаз}-70,5WC-4,5Co$, что свидетельствует о возможности его использования для изготовления эффективных буровых инструментов различного технологического назначения.

3.1.3 Исследование морфологии поверхностей трения образцов КАМ методом оптической микроструктуры

На рис. 3.3 представлены оптические изображения микроструктуры режущих участков, полученные при различной поляризации спеченного образца КАМ $25C_{алмаз}-70,5WC-4,5Co$. Они иллюстрируют особенности прочности сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей. Анализ рис. 3.3 (а, б) показал, что на режущей кромке образца КАМ $25C_{алмаз}-70,5WC-4,5Co$ (образец 1 без добавки CrB_2) в процессе испытания на износостойкость в описанных выше режимах наблюдаются участки отрыва (ямы, из которых выпали алмазные зерна).

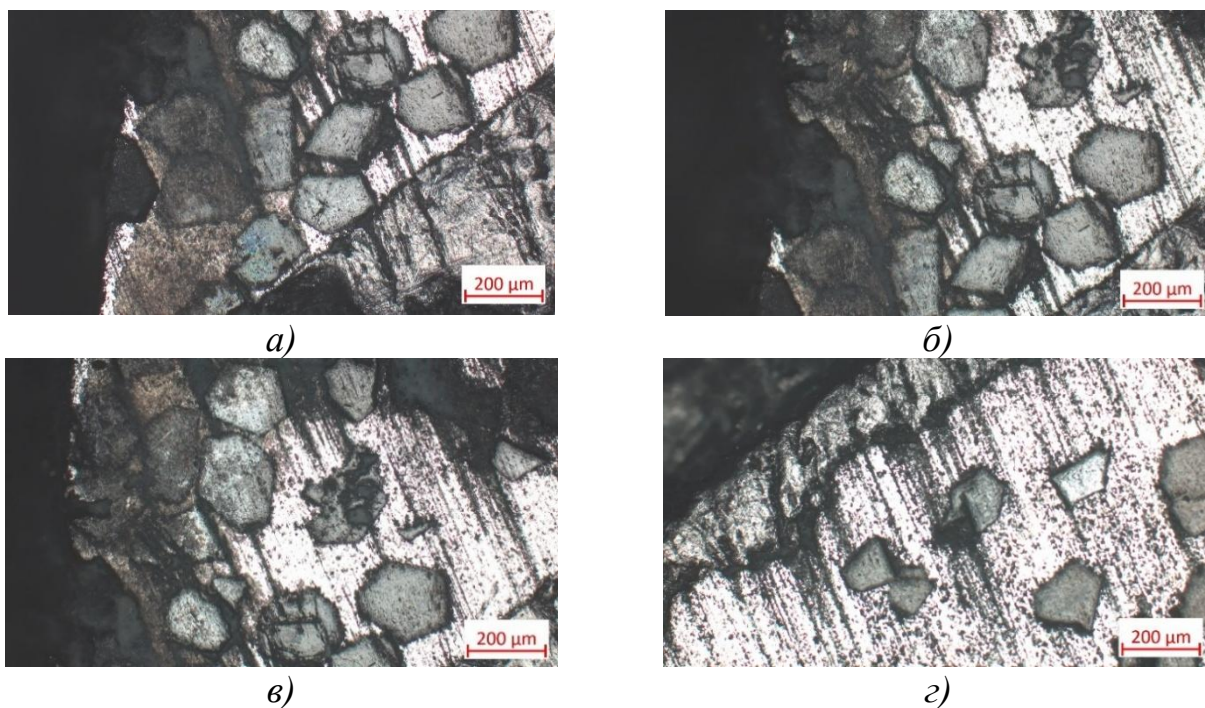


Рисунок 3.3 – Оптические изображения микроструктуры режущих участков спеченного образца $\text{KAM } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ после испытания на износостойкость

В этом случае поверхность твердосплавной матрицы подвергается сильному абразивному изнашиванию (рис. 3.3, в, г). Приведенные выше результаты позволяют считать, что в спеченном образце $\text{KAM } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ недостаточна прочность сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей, что снижает их износостойкость, и, как следствие, износостойкость инструментов, изготовленных на их основе.

В отличие от образца $\text{KAM } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ на режущей поверхности образца $\text{KAM } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-66,74\text{WC}-4,26\text{Co}-4\text{CrB}_2$ выявлено отсутствие участков отрыва (рис. 3.4, а, б, в), что свидетельствует о более прочном сцеплении алмазных зерен с твердосплавной матрицей.

В случае наличия участков отрыва алмазных зерен от твердосплавной матрицы на режущей поверхности образца $\text{KAM } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-66,74\text{WC}-4,26\text{Co}-4\text{CrB}_2$ наблюдаются участки, которые подвержены сильному абразивному изнашиванию (рис. 3.4, г).

При дальнейшем увеличении концентрации диборида хрома наблюдали присутствие участков отрыва алмазных зерен от твердосплавной матрицы (рис. 3.5, а, б). В этом случае твердосплавная матрица подвергается интенсивному абразивному изнашиванию (рис. 3.5, в, г).

Полученные результаты показывают, что введение 10 % CrB_2 в состав $\text{KAM } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ (образец 3) приводит к ухудшению алмазоудержания в этом композите. В этом причина того, что в образце $25\text{C}_{\text{алмаз}}-61,1\text{WC}-3,9\text{Co}-10\text{CrB}_2$ значения скорости износа по весу W_R , скорости износа по объему

W_V и удельной скорости износа W_S больше, чем в образце КАМ 25С_{алмаз}-66,74WC-4,26Co-4CrB₂ (табл. 3.1).

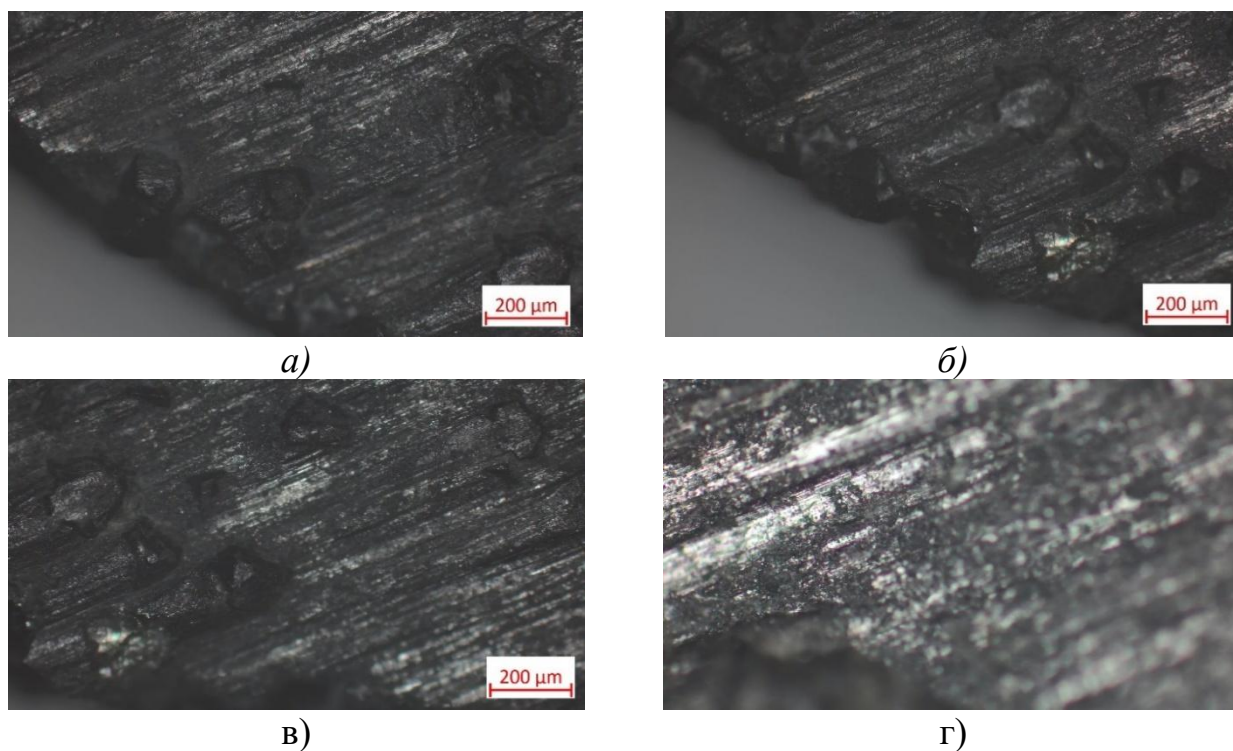


Рисунок 3.4 – Оптические изображения микроструктуры режущих участков спеченного образца КАМ 25С_{алмаз}-66,74WC-4,26Co-4CrB₂ после испытания на износостойкость

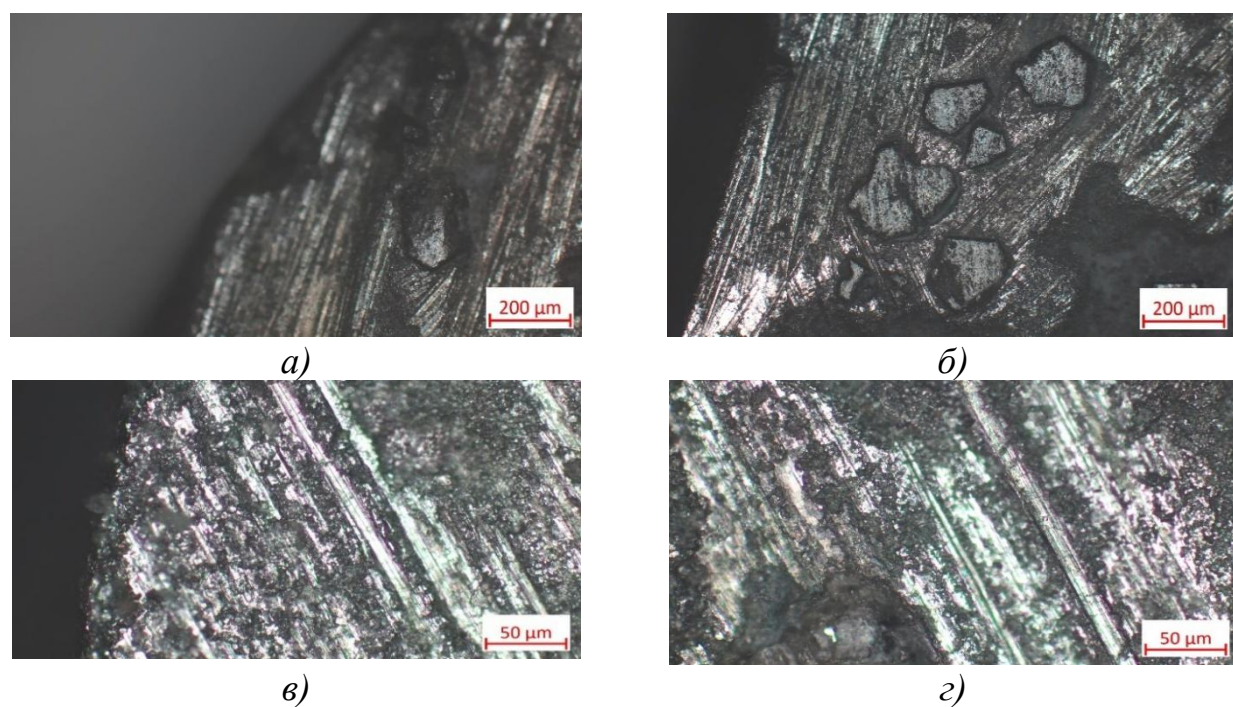


Рисунок 3.5 – Оптические изображения микроструктуры режущих участков спеченного образца КАМ 25С_{алмаз}-61,1WC-3,9Co-10CrB₂ после испытания на износостойкость

Оптические изображения микроструктуры (рис. 3.6), полученных при различной поляризации, еще раз свидетельствуют в том, что в спеченном образце КАМ без добавки микропорошка CrB_2 сформировано недостаточно прочное сцепление алмазных зерен с твердосплавной матрицей. В этом случае на поверхности образца КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ наблюдаются участки, из которых оторвались алмазные зерна от твердосплавной матрицы (рис. 3.6, *а, в, д*), а твердосплавная матрица подвержена интенсивному абразивному износу (рис. 3.6, *б, г, е*). На участках твердосплавной матрицы, которые подвергались сильному абразивному износу, отчетливо видно широкие и глубокие бороздки, которые образовались в результате интенсивного взаимодействия КАМ с горной породой (рис. 3.6, *б, г, е*).

Добавление микропорошка CrB_2 в количестве 4 % в состав КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ обеспечивает более прочное сцепление алмазных зерен с твердосплавной матрицей. В этом случае на поверхности образца КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-66,74\text{WC}-4,26\text{Co}-4\text{CrB}_2$, отсутствуют участки, из которых оторвались алмазные зерна (рис. 3.7, *а, в, г*), а поверхность твердосплавной матрицы подвержена меньшему абразивному износу (рис. 3.7, *б, г, д*), чем твердосплавная матрица образца КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ (рис. 3.6, *б, г, д*).

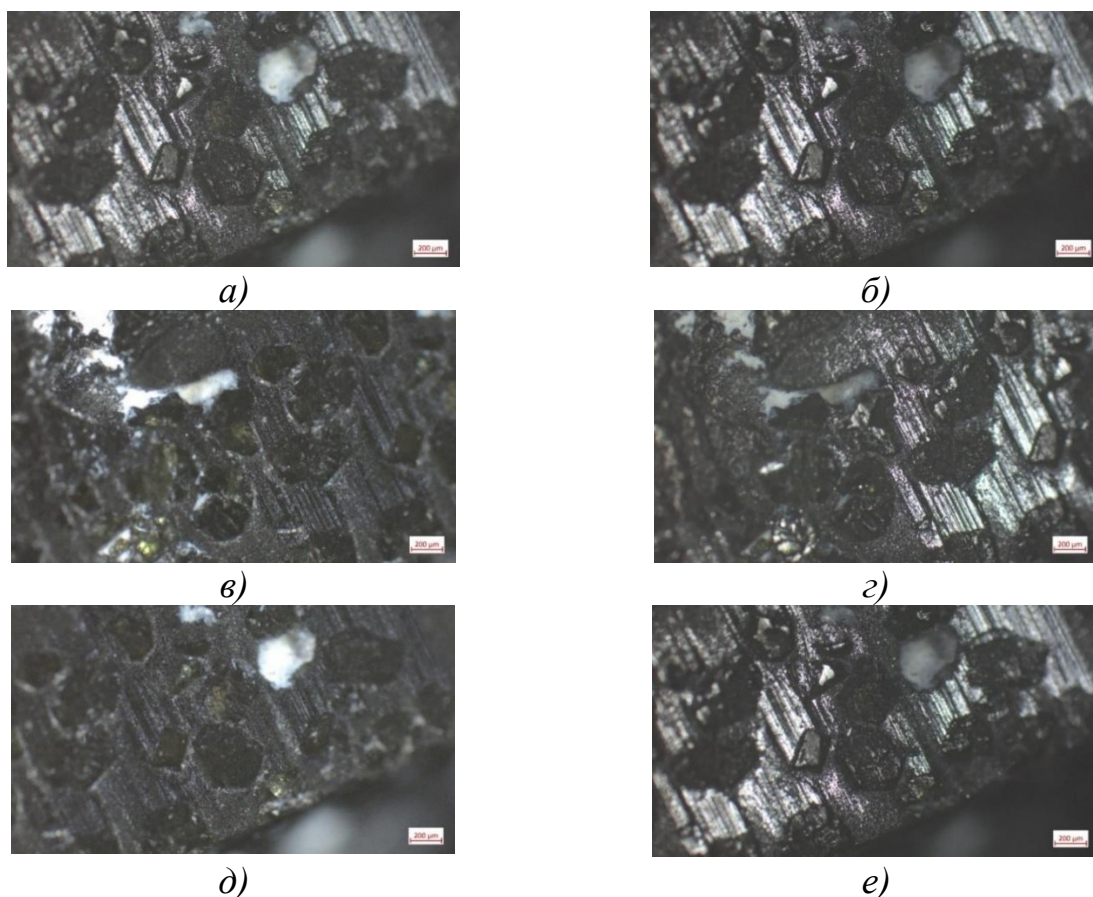


Рисунок 3.6 – Оптические изображения микроструктуры режущих участков спеченного образца КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$, полученные при различной поляризации, после испытания на износостойкость

Таким образом, из приведенных выше данных следует, что добавление микропорошка CrB_2 в количестве 4 % в состав КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ при-

водит к повышению его износостойкости и, как следствие, износостойкости бурового инструмента, изготовленного на его основе. При дальнейшем увеличении содержания добавки микропорошка диборида хрома (10 % мас.) наблюдали ухудшение алмазодержания. В этом случае в образце КАМ 25C_{алмаз}-61,1WC-3,9Co-10CrV₂ были обнаружены участки твердосплавной матрицы (ямы), от которых отрывались алмазные зерна, что снижает износостойкость и ограничивает его применение.

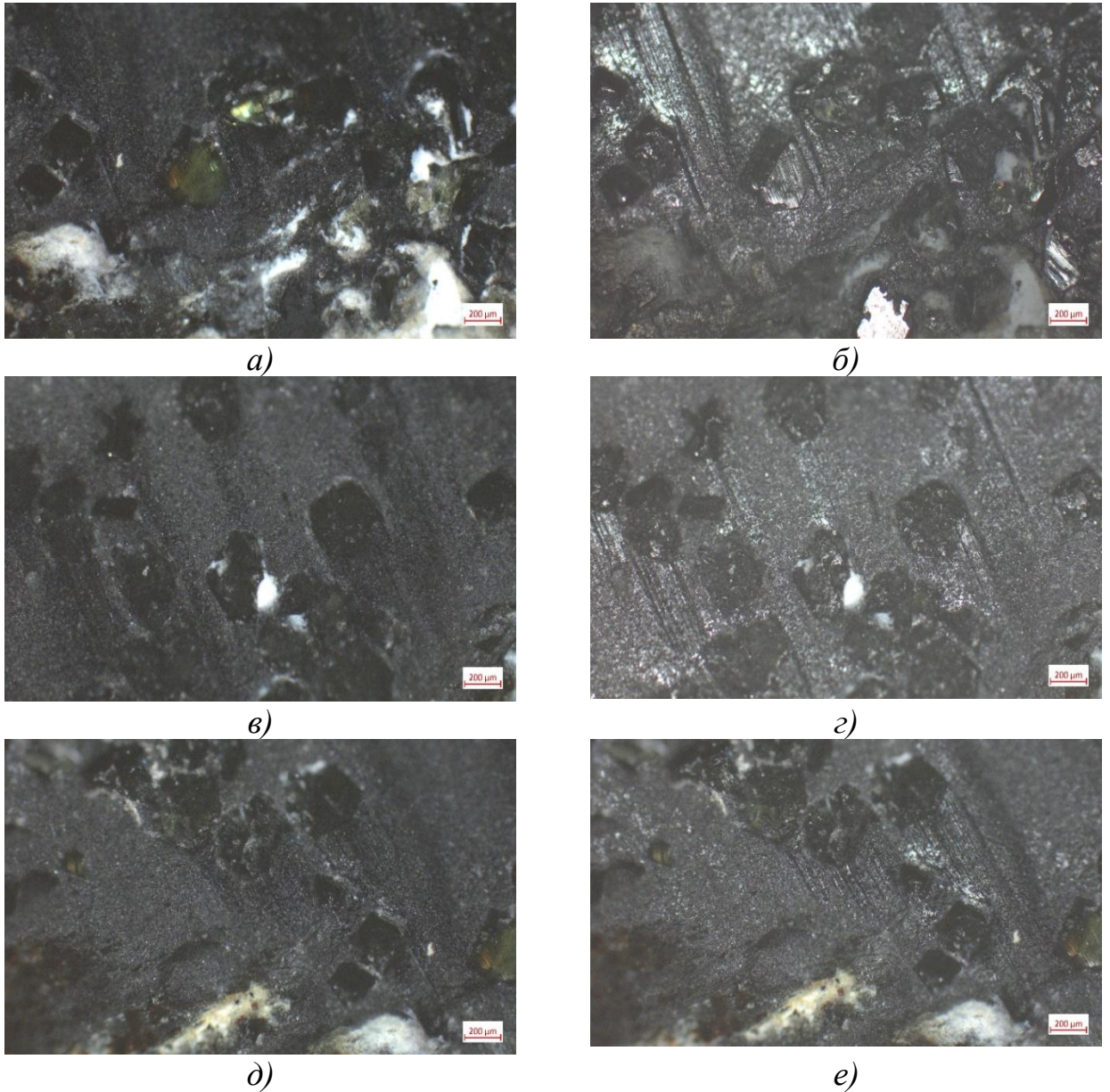


Рисунок 3.7 – Оптические изображения микроструктуры режущих участков спеченного образца КАМ 25C_{алмаз}-66,74WC-4,26Co-4CrV₂, полученные при различной поляризации, после испытания на износостойкость

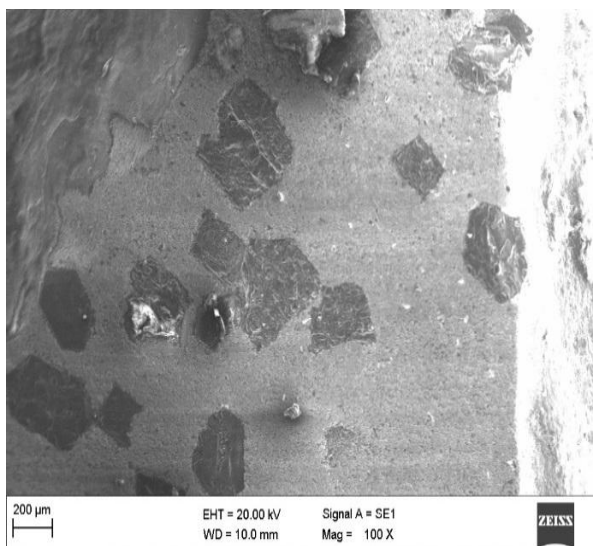
3.1.4 Исследование микроструктуры образцов КАМ методом сканирующей электронной микроскопии

Полученные данные подтверждает сканирующее электронно-микроскопическое исследование (СЭМ-изображения) поверхности шлифов спеченных образцов КАМ. Как видим (рис. 3.8, *a, б*) на выделенном участке режущей поверхности образца КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ (образец 1), сформированного методом ПИС, наблюдаются участки отрыва (светлые области) алмазных зерен от твердосплавной матрицы. На изображениях (3.8, *б, в*), полученных при большем увеличении, видно, что в твердосплавной матрице и на границе раздела алмаз-матрица наблюдаются сколы и зазоры, а на межфазных границах наблюдаются поры. Таким образом, из приведенных данных следует, что сколы, зазоры и поры, которые образуются при формировании образца $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ (образец 1), приводят к выпадению алмазных зерен с твердосплавной матрицы, что снижает его износостойкость и ограничивает возможности его использования для разработки инструментов для бурения прочных и абразивных горных пород.

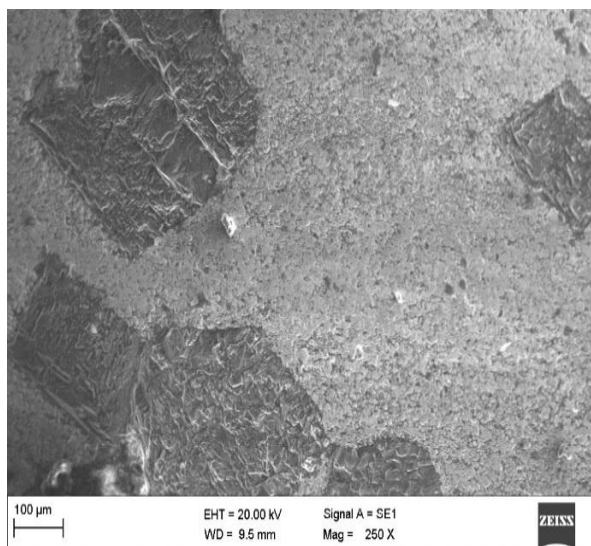
При введении в состав шихты $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ добавки микропорошка CrB_2 в количестве 4 % (образец 2) в спеченном КАМ повышается прочность сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей. КАМ. Так, на режущей поверхности образца КАМ $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ в отличие от образца КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ не обнаружено участков отрыва алмазных зерен от твердосплавной матрицы (рис. 3.9, *a, б*). Следует отметить, что при введении в состав КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ добавки микропорошка диборида хрома в количестве 4 % в твердосплавной матрице произошло измельчение зерен карбида вольфрама из 5,6 до 3,4 мкм. При этом взвешенное распределение размеров зерен исходного образца более растянуто в сторону более крупных зерен.

Следует обратить внимание на значительное растворение компонентов в системе $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)-CrB_2$. Так, если для образца КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ (образец 1) характерна незначительная растворимость компонентов друг в друге, то для образца КАМ $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ (образец 2) имеет место существенное взаимное растворение компонентов, что приводит к уменьшению их размеров в процессе спекания.

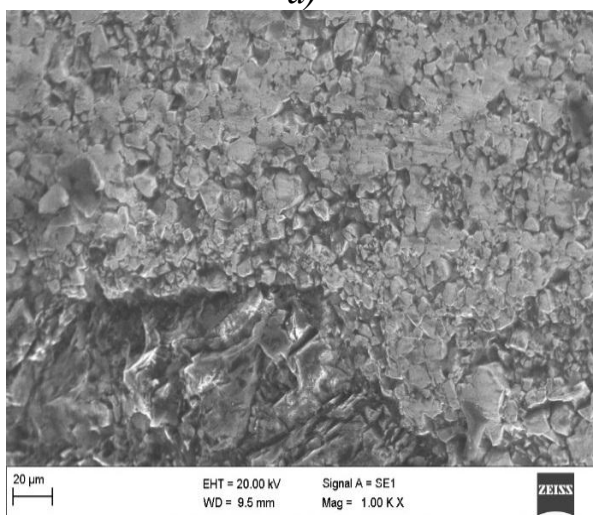
Таким образом, показано локализацию фазы CrB_2 на межзеренных границах и ее кластеризацию при увеличении содержания. Наличие данной фазы препятствует процессам освальдовского созревания и выступает в качестве ингибитора роста, обеспечивая почти двукратное уменьшение размера зерен при содержании 4 % CrB_2 . Важным является и то, что контакт алмаз-твердосплавная матрица плотный, границы между зернами тонкие, четко сформированные, без видимых пор и трещин, между частицами наблюдается сплошные физические контакты, что способствует прочному сцеплению алмазных зерен с твердосплавной матрицей композита (рис. 3.9, *в, г, д, е*).



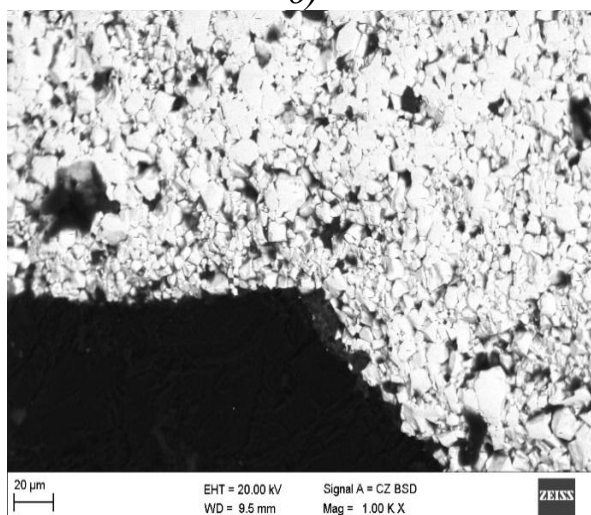
a)



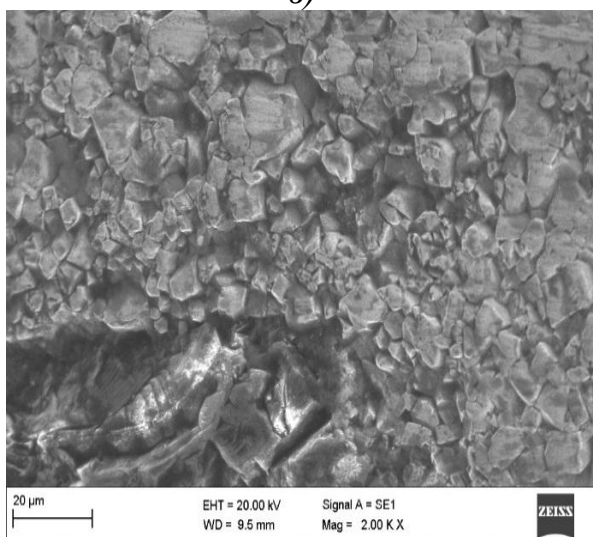
б)



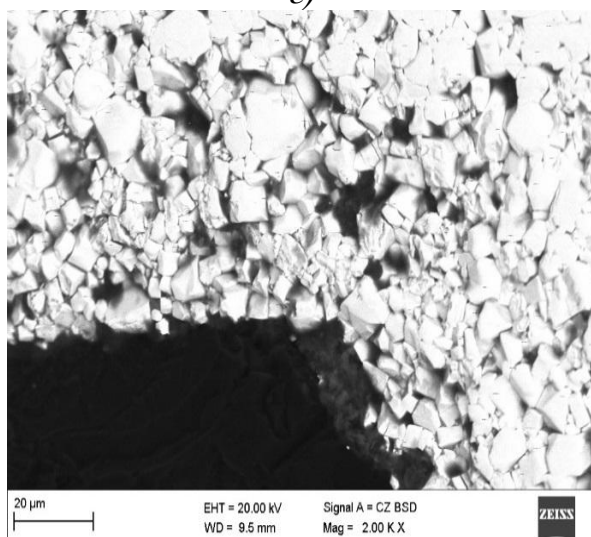
в)



г)

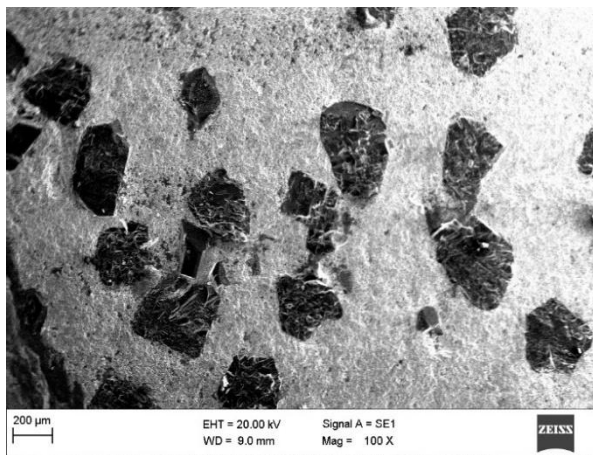


д)

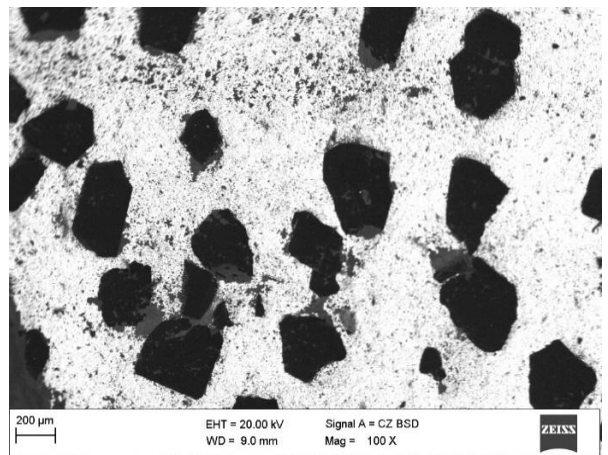


е)

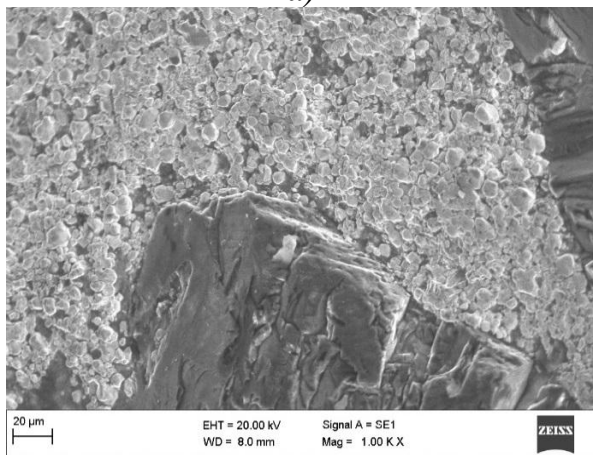
Рисунок 3.8 – СЭМ-изображения участков микроструктуры образца КАМ 25С_{алмаз}–70,5WC–4,5Co, сформированного методом ПИС



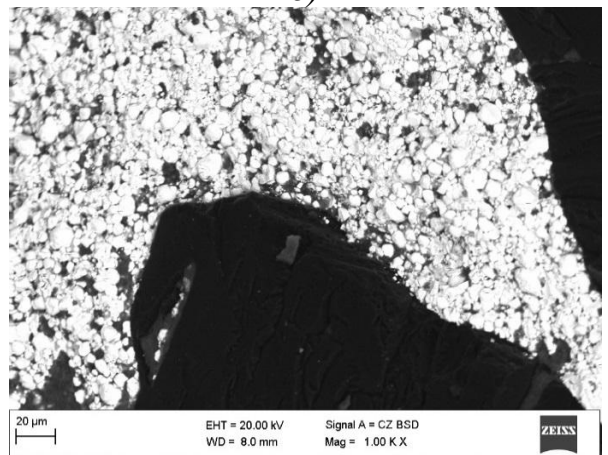
a)



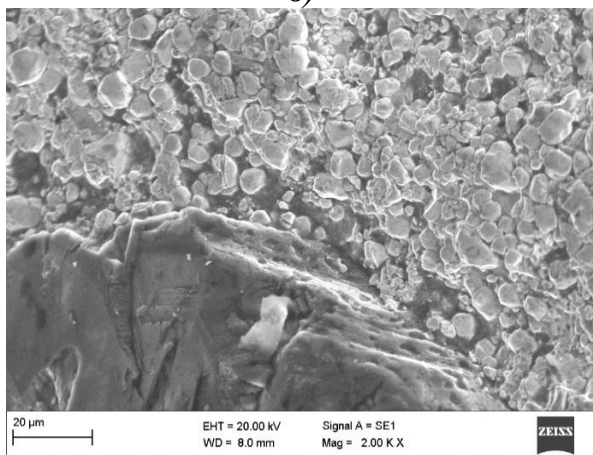
б)



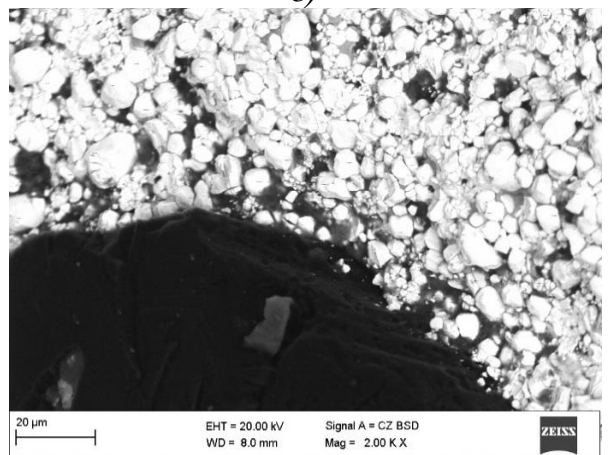
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.9 – СЭМ-изображения участков микроструктуры образца КАМ $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$, сформированного методом ПИС

В спеченном образце КАМ $25C_{\text{алмаз}}-61,1WC-3,9Co-10CrB_2$ (образец 3) по сравнению с образцом КАМ $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ (образец 2) выявлено менее прочное сцепление алмазных зерен с твердосплавной матрицей. Так, на режущей поверхности этого образца обнаружены участки отрыва алмазных

зерен от твердосплавной матрицы (рис. 3.10, а, б), а в объеме твердосплавной матрицы и на границе раздела алмаз-матрица наблюдаются сколы, зазоры и поры (рис. 3.10, в, г), что снижает их износостойкость. Кроме того, на изображениях (рис. 3.10, д, е), полученных при большем увеличении четко видны участки в матрице, которые разрушены скалыванием и растрескиванием вследствие интенсивного абразивного изнашивания.

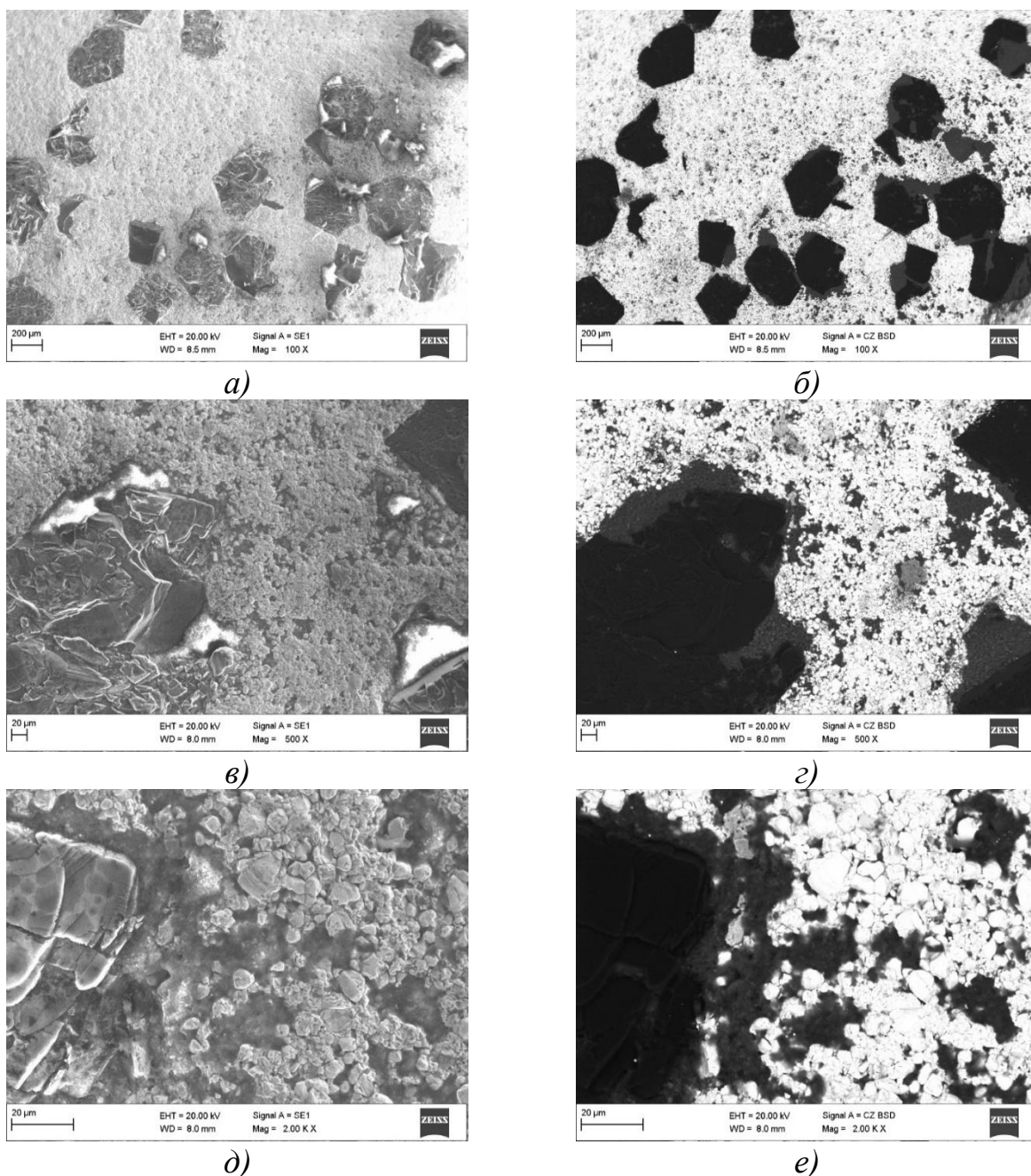


Рисунок 3.10 – СЭМ-изображения участков микроструктуры образца КАМ 25С_{алмаз}–61,1WC–3,9Со–10CrV₂, сформированного методом ПИС

Из представленных данных следует, что добавление добавки микропорошка диборида хрома CrV₂ в количестве 10 % (мас.) в состав шихты 25С_{алмаз}–70,5WC–4,5Со приводит к преждевременному выпадения алмазных зерен из

твердосплавной матрицы в спеченном КАМ $25C_{\text{алмаз}}-61,1WC-3,9Co-10CrB_2$, что снижает износостойкость и ограничивает их использования в инструментах для бурения прочных и абразивных горных пород.

Таким образом, из приведенных выше данных следует, что в образце $25C_{\text{алмаз}}-61,1WC-3,9Co-10CrB_2$ значения скорости износа по весу W_R и по объему W_V , а также значения удельной скорости износа W_S больше, чем в образце КАМ $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ (табл. 3.1).

Дополнительно было проведено элементное картирование (методом EDS) участка режущей поверхности спеченных образцов КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ (образец 1), $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ (образец 2) и $25C_{\text{алмаз}}-61,1WC-3,9Co-10CrB_2$ (образец 3). На рис. 3.11 приведено электронное изображение (СЭМ-изображение) участка структуры (а, б) и карты распределения С (в), W (г), Co (д) образца 1. Структура этого образца является гетерофазной, состоит из крупных зерен алмаза в виде темной фазы и более мелких фаз WC и Co (серые фазы). На контакте алмаз–матрица наблюдаются несплошности и поры, а на межфазных границах – поры (рис. 3.11, а). На рис. 3.11, в–д отчетливо видны некоторые неоднородности в распределении элементов.

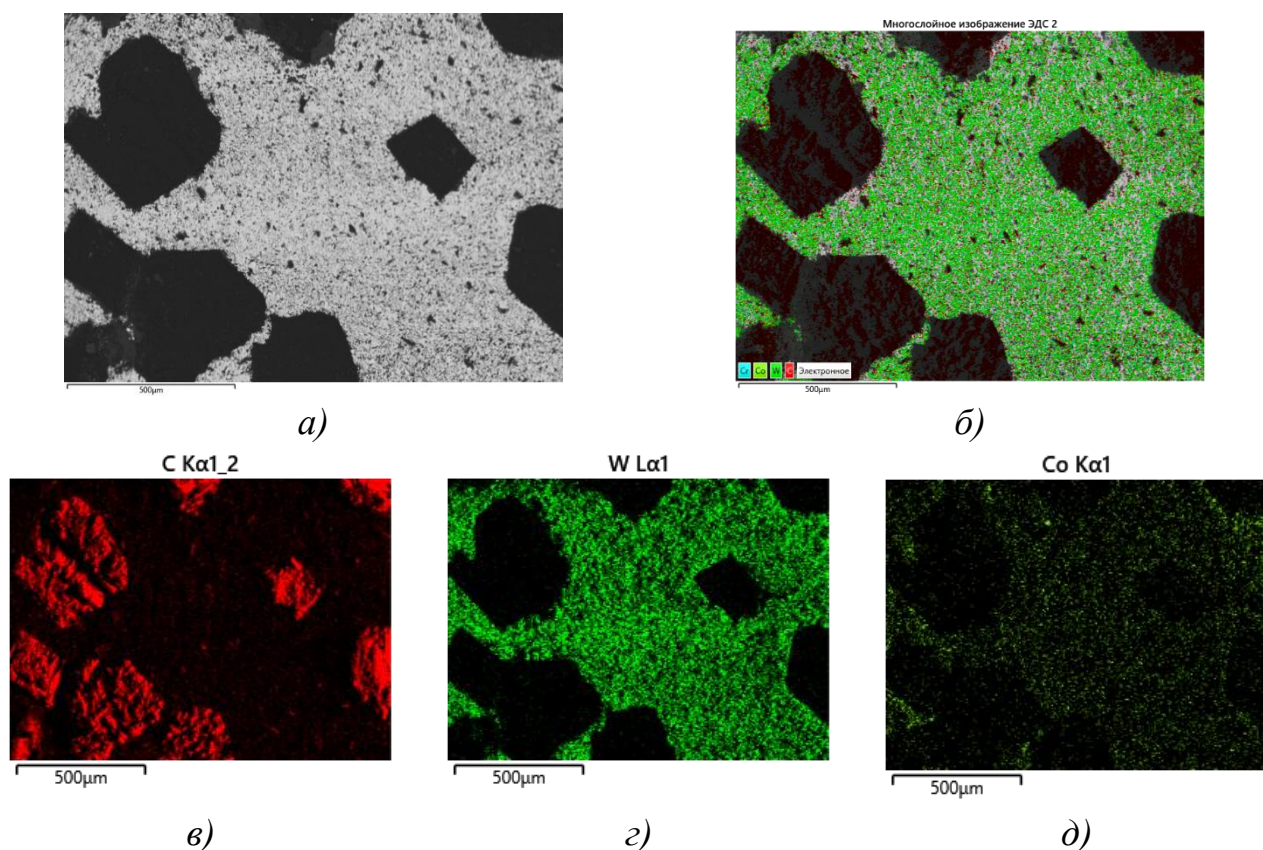


Рисунок 3.11 – Электронно-микроскопическое изображение участка поверхности образца КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ (а, б) и карты распределения С (в) W(г) и Co (д) по тому же участку поверхности

Присутствие добавки микропорошка CrB_2 в составе образца $\text{КАМ } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ в количестве 4 % (образец 2) способствует измельчению структуры (уменьшению размера WC (рис. 3.12, *а*)) и более равномерному распределению элементов (рис. 3.12, *б, в, г*). При этом диборид хрома распределен равномерно (рис. 3.12, *г*). Незначительные, хотя и заметные вариации, вероятно связаны с топологией. Это позволяет предположить, что обогащенные диборидом хрома фазы равномерно распределены в материале твердосплавной матрице.

Добавление микропорошка 10 % CrB_2 в образец $\text{КАМ } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ (образец 3) способствует более равномерному распределению элементов (рис. 3.12) по сравнению с образцами 1 и 2 (рис. 3.10 и рис. 3.12).

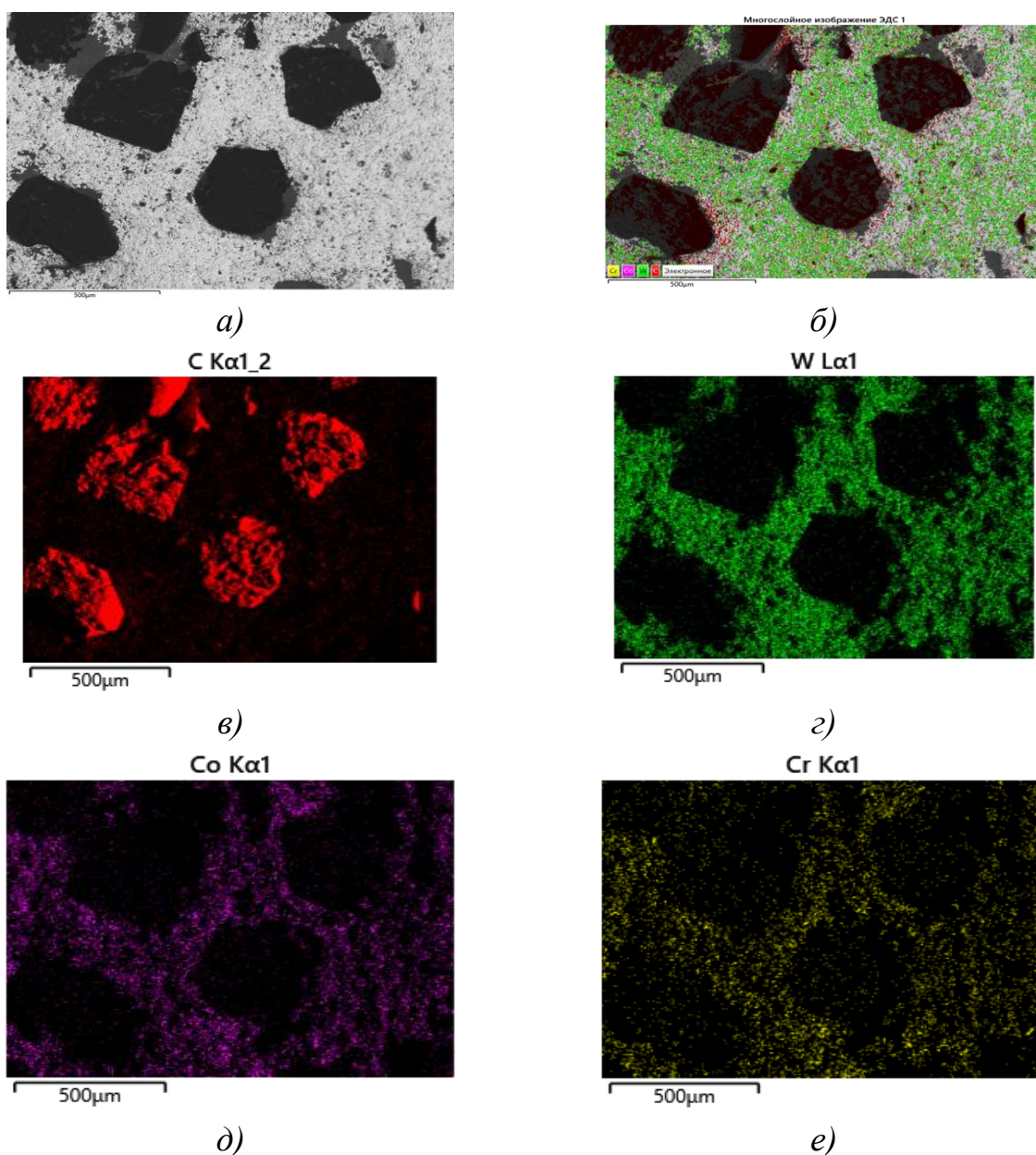


Рисунок 3.12 – Электронно-микроскопическое изображение участка поверхности образца $\text{КАМ } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-66,74\text{WC}-4,26\text{Co}-4\text{CrB}_2$ (*а, б*) и карты распределения C (*в*), W (*г*), Co (*д*) и Cr (*е*) по тому же участку поверхности

Образование такой структуры связано с влиянием добавки CrB_2 . Приведенные изображения иллюстрируют эффект уменьшения размера зерен и равномерного распределения элементов в образцах с содержанием CrB_2 в количестве 4 % и 10 % (рис. 3.12, *a* и рис. 3.13, *a*) по сравнению с исходным образцом (рис. 3.11, *a*).

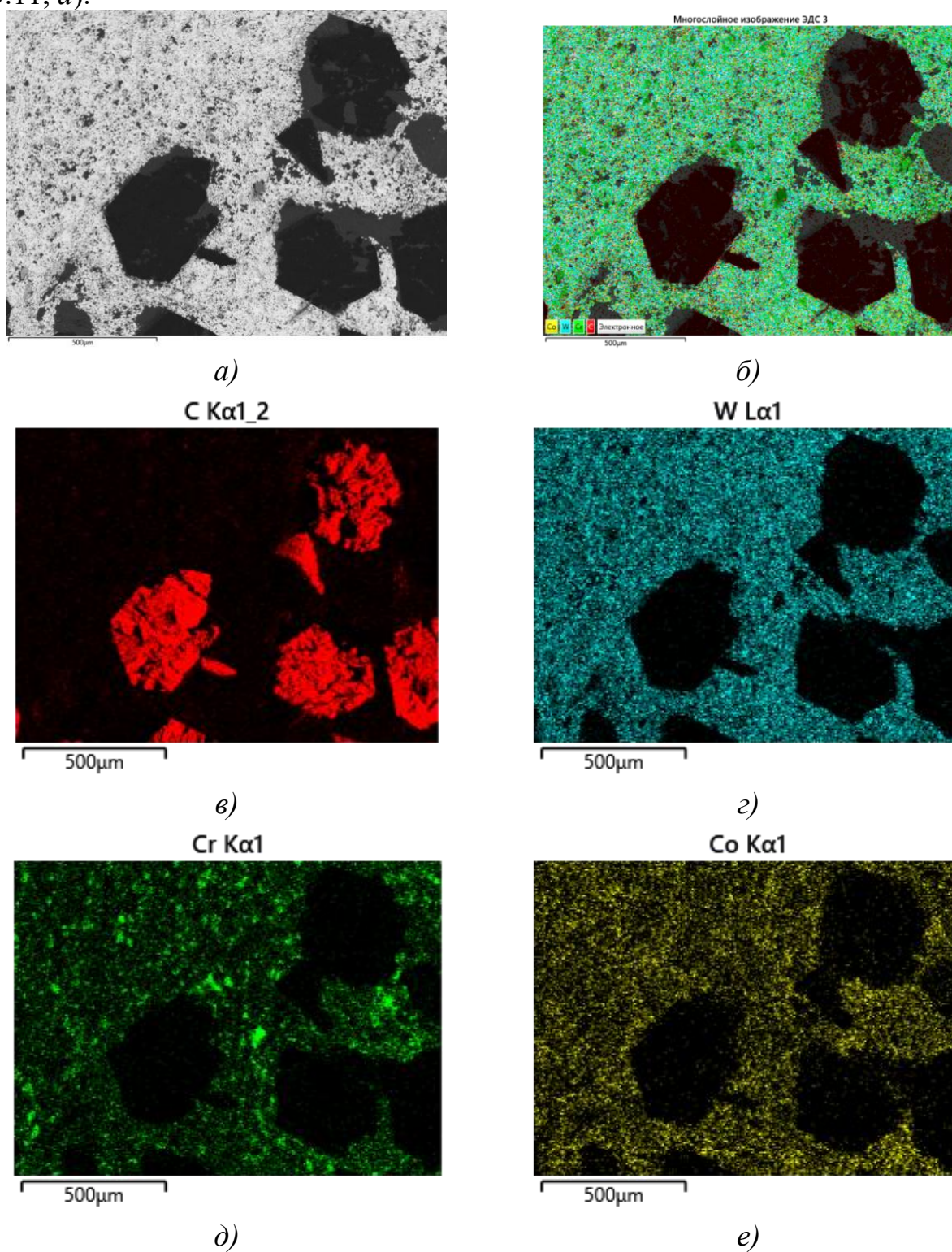


Рисунок 3.13 – Электронно-микроскопическое изображение участка поверхности образца $\text{КАМ } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-61,1\text{WC}-3,9\text{Co}-10\text{CrB}_2$ (*a*, *б*) и карты распределения C (*в*), W (*г*), Cr (*д*) и Co (*е*) по тому же участку поверхности

При этом присутствие CrB_2 в составе исходной шихты препятствует процессам Освальдовского созревания (поглощение малых зерен большими) и выступает в качестве ингибитора роста, обеспечивая уменьшение зерна карбида вольфрама при содержании 4%, что в свою очередь приводит к увеличению межфазных поверхностей раздела в КАМ.

По аналогии с соотношением Холла-Петча [78], в таком случае твердость и износостойкость композита должна увеличиваться, что согласуется с ранее приведенными данными. Важно также и то, что контакт алмаз–матрица плотный, что способствует прочному сцеплению алмазных зерен с матрицей композита.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что использование микропорошка диборида хрома при концентрации (~4 %) в составе композита КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ и применения метода ПИС перспективно для производства КАМ с повышенными механическими характеристиками, и как следствие, – высокоэффективного бурового инструмента на их основе.

3.1.5 Фрактографический анализ образцов КАМ

Ниже рассмотрено экспериментальные данные по исследованию структурного изменения в области разрушения при ударном нагружении образцов композитов $\text{C}_{\text{алмаз}}-(\text{WC}-\text{Co})-\text{CrB}_2$. На рис. 3.14 представлена общим планом поверхность разрушения спеченного образца композита $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ (образец 1) в композиционном (в упругоотраженных электронах) и морфологическом (во вторичных электронах) контрасте в условиях ударной нагрузки.

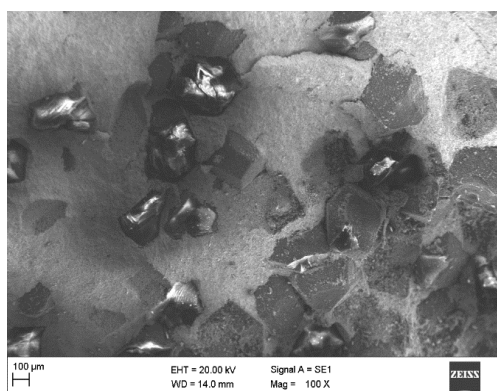
Микроструктурные изображения поверхности после излома (рис. 3.14, а б) образца КАМ 1 показывают, что в твердосплавной матрице наблюдается значительное количество ямок, из которых оторвались алмазные зерна. В этом случае поверхность излома твердосплавной матрицы на микро- и макроуровнях характеризуется сильной рельефностью и значительным количеством дефектов различной природы (трещины, поры и другие дефекты) (рис. 3.14, в–е). В целом из представленных данных следует, что структура твердосплавной матрицы этого образца имеет вид преимущественно хрупкого разрушения, о чем свидетельствует гладкий рельеф поверхности.

СЭМ-изображения изображения поверхности излома (рис. 3.15), полученные в композиционном контрасте, с зонами проведения микроанализа и результаты определения элементного состава (табл. 3.3) показывают, что на поверхности алмазных зерен присутствуют фазы WC (спектр 1, рис. 3.15, табл. 3.3) и Co (спектры 2 и 3, рис. 3.15, табл. 3.3).

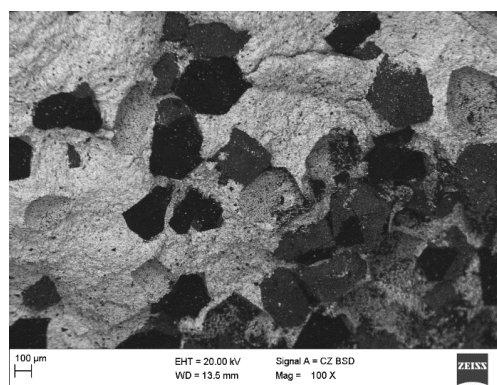
Из представленных результатов следует, что разрушение при ударном нагружении образца композита $\text{C}_{\text{алмаз}}-(\text{WC}-\text{Co})$ (образец 1) происходит по поверхности алмазного зерна и твердосплавной матрицы по смешанному (межкристаллическому и транскристаллическому) механизму разрушения. Все это свидетельствует о слабом сцеплении алмазных зерен с твердосплавной матрицей, что может вызвать преждевременное выпадение алмазных зерен из матрицы и, как следствие, интенсивный износ КАМ в процессе его работы.

Таблица 3.3 – Элементный состав на поверхности алмазного зерна после разрушения сколом образца КАМ 1

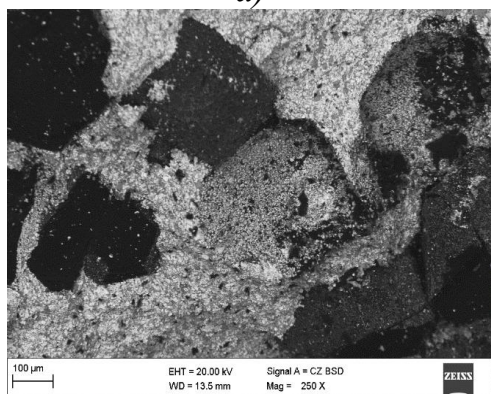
Спектры	Содержание химических элементов, мас. %			
	C	O	Co	W
1	16,13			83,87
2	96,88		2,32	0,80
3	89,27	0,35	6,82	3,56



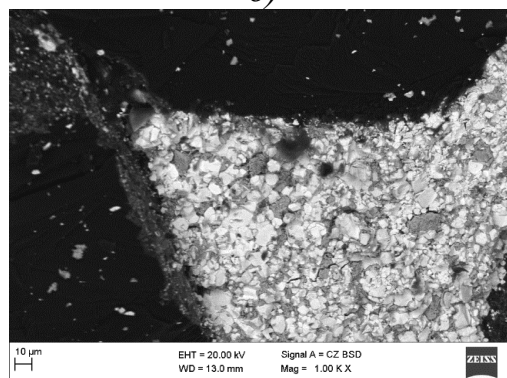
a)



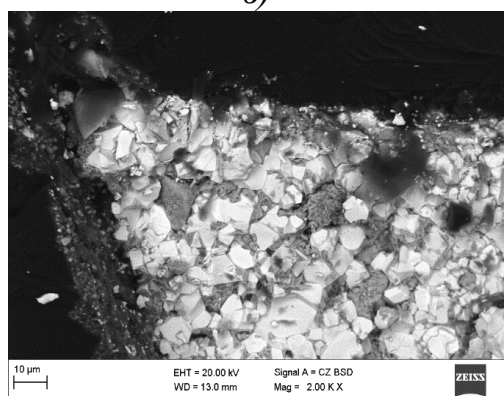
б)



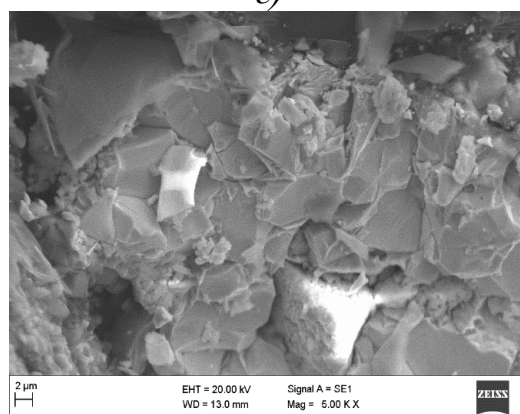
в)



з)



д)



е)

Рисунок 3.14 – СЭМ-изображения в композиционном (*a, в*) и морфологическом (*б, з*) контрасте микроструктуры излома спеченного образца КАМ 1 без CrV₂

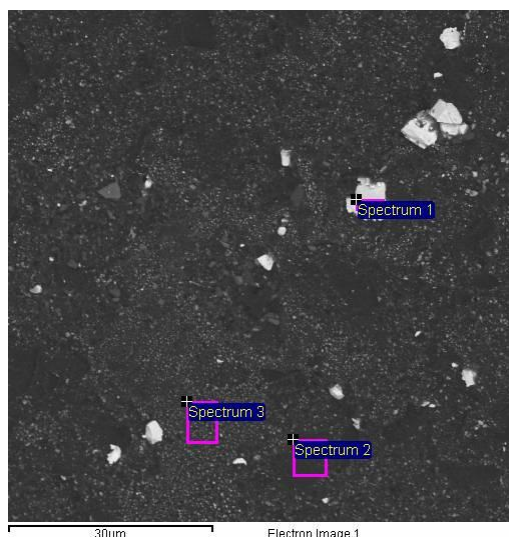


Рисунок 3.15 – СЭМ-изображение поверхности алмазного зерна после разрушения ударом спеченного образца КАМ 1 (а) в композиционном контрасте.

В отличие от образца КАМ 1, излом образца КАМ 2, содержащего 4 мас.% CrB_2 , проходит по телу алмазного зерна (рис. 3.16, а, б), то есть разрушение алмазных зерен происходит путем скола. В этом случае на выделенном участке образца 2 отсутствуют ямки, из которых оторвались алмазные зерна. Отличительной особенностью излома образца КАМ 2 (рис. 3.16, а, б) по сравнению с образцом 1 (рис. 3.14, а, б) является и то, что на границе раздела алмаз–матрица отсутствуют зазоры, каверны и несплошности.

Важно отметить, что при спекании образца КАМ 2 на фоне однородной мелкозернистой микроструктуры твердосплавной матрицы с размером зерен 3–4 мкм сформирован плотный контакт алмаз–матрица при отсутствии трещин, каверн, пор и несплошностей (рис. 3.16, в–е). Представленные на рис. 3.14 и 3.16 результаты позволяют предположить, что в образце 2, в отличие от образца 1, сформировано более прочное сцепление алмазных зерен с твердосплавной матрицей, что очень важно для разработки буровых инструментов с высокими механическими и эксплуатационными характеристиками.

Микроструктура макроизлома матрицы в образцах КАМ также отличается. В целом, наибольшая плотность макроступеней, берущих начало у границы контактирования алмаз–матрица, как и в целом частиц алмаза, разрушенных сколом и окаймленных областями матрицы со ступенями, наблюдается для образца КАМ 2 (рис. 3.16, з–е), а наименьшее – для образца КАМ 1 (рис. 3.14, з, д).

Микрорельеф скола зерен алмаза в исследуемых образцах КАМ также отличается. В образце КАМ 1 скол обычно происходит от единичного источника напряжений, находящегося на границе контакта алмаза с матрицей, а в образце КАМ 2 такие источники трещин формируются от перенапряжений, возникающих в объеме алмазных зерен за счет всестороннего их сжатия матрицей.

Поскольку в последнем случае на поверхностях разрушения алмазных зерен формируется сильно развитый микрорельеф с высокой плотностью разнонаправленных ступенек скола, то это указывает на множественное разветвление разрушающей трещины (рис. 3.16, *з-е*).

Из приведенных выше данных следует, что добавление микропорошка CrB_2 в количестве 4 % в состав $\text{КАМ } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ обеспечивает повышение в 2 раза его износостойкости (табл. 3.2), что позволяет его использовать для изготовления алмазного бурового инструмента с повышенными механическими и эксплуатационными характеристиками.

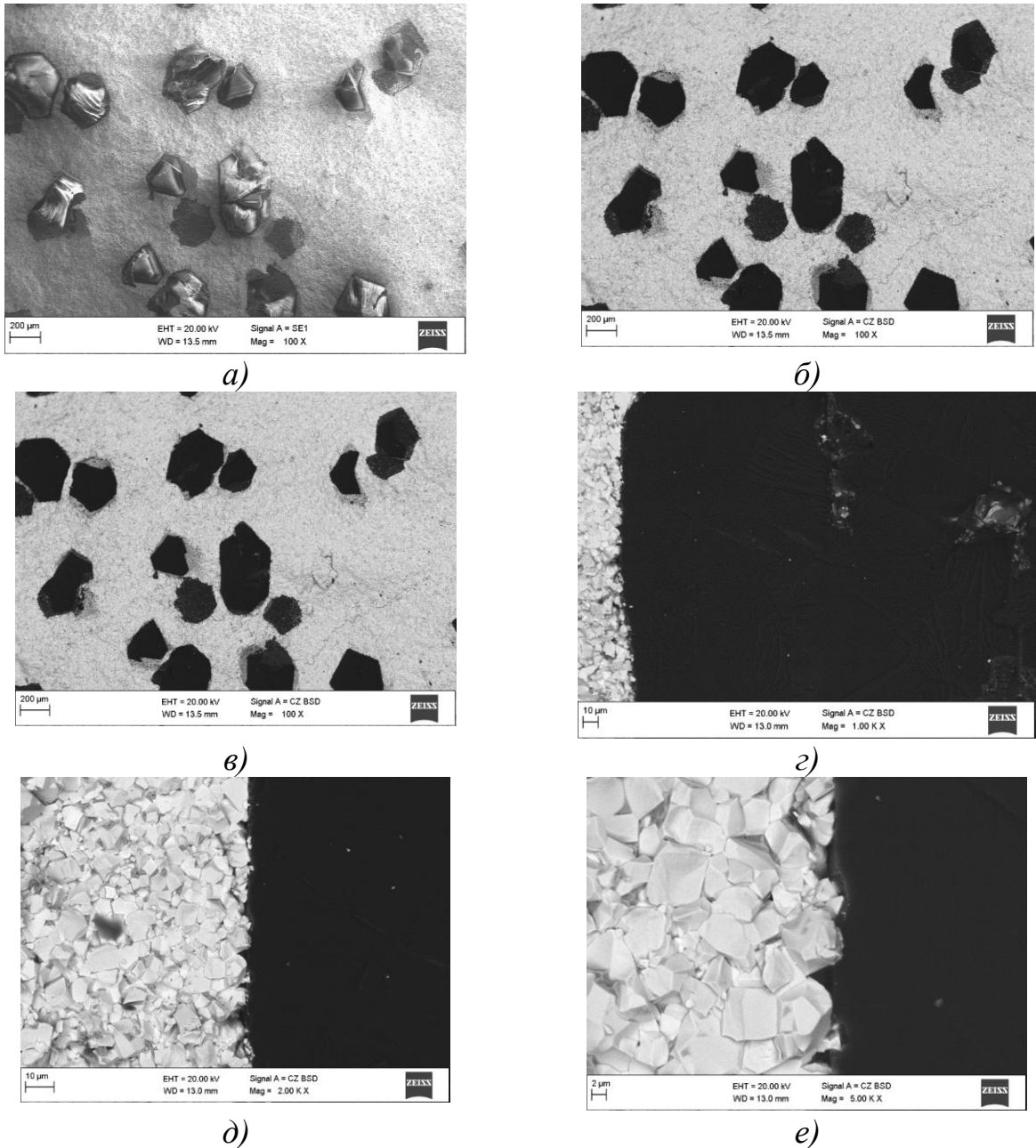
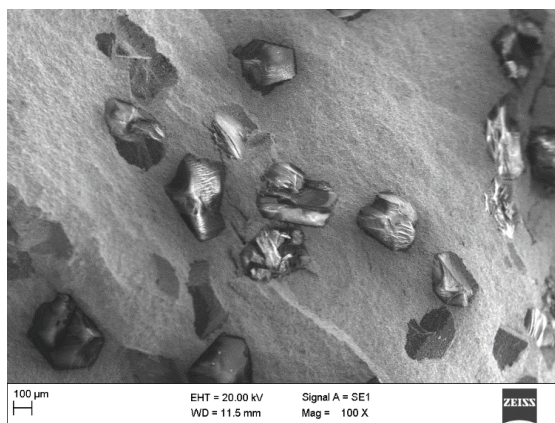
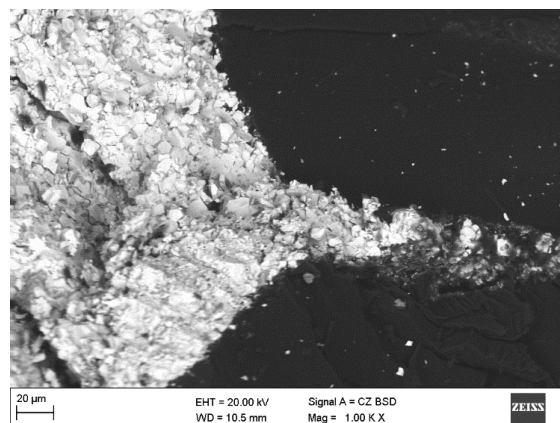


Рисунок 3.16 – СЭМ-изображения в композиционном (*а, в, д*) и морфологическом (*б, г, е*) контрасте микроструктуры излома спеченного образца $\text{КАМ } 25\text{C}_{\text{алмаз}}-66,74\text{WC}-4,26\text{Co}-4\text{CrB}_2$ (образец 2)

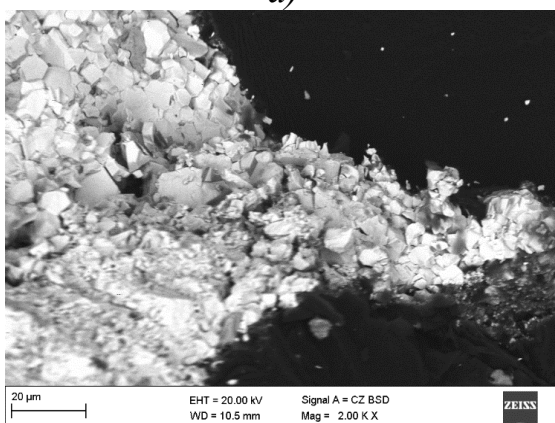
На поверхности излома образца КАМ 3, содержащего в составе 10 мас.% CrV_2 , в отличие от образца КАМ 2 (рис. 3.16, а–в) обнаружено две ямки, из которых оторвались алмазные зерна (рис. 3.17, а). Это указывает на то, что прочность сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей в образце КАМ 3 более слабая в отличие от образца КАМ 2.



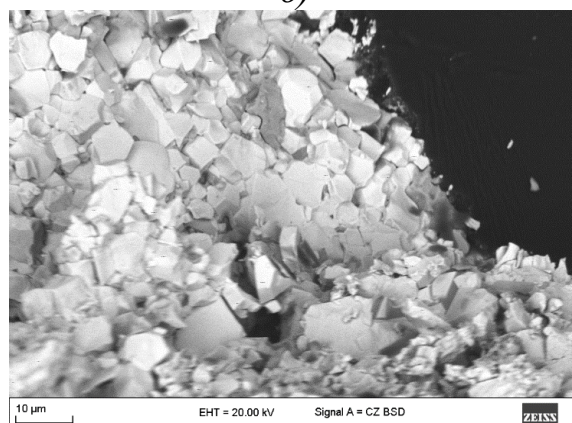
а)



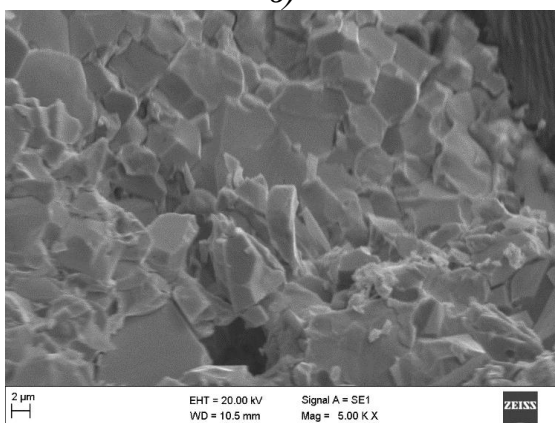
б)



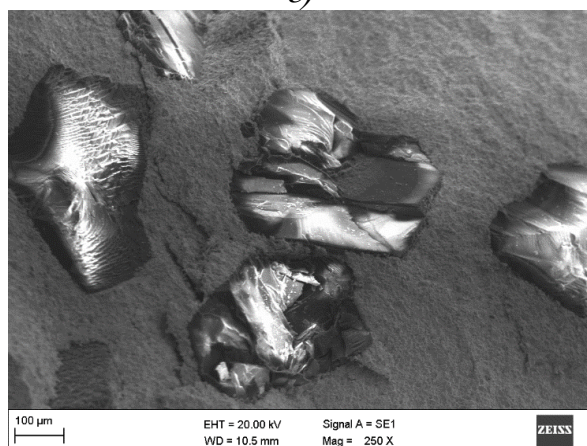
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.17 – СЭМ-изображения в композиционном (а, в, д) и морфологическом (б, г, е) контрасте микроструктуры излома спеченного образца КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-61,1\text{WC}-3,9\text{Co}-10\text{CrV}_2$ (образец 3)

В этом случае поверхность излома твердосплавной матрицы образца КАМ $25C_{\text{алмаз}}-61,1WC-3,9Co-10CrB_2$ (образец 3) на микро- и макроуровнях характеризуется как гладкой, так и развитой рельефностью и наличием дефектов различной природы (трещины, поры и другие дефекты) (рис. 3.17, б–д). Из представленных результатов следует, что разрушение твердосплавной матрицы в образце КАМ 3 происходит по смешанному (межкристаллическому и транскристаллическому) механизму разрушения.

3.2 Исследование изнашивания алмазных буровых инструментов

3.2.1 Изготовление бурового инструмента

В качестве изучаемых объектов выбраны коронки алмазные импрегнированные типа БС-04 1 и 2 диаметром 59 мм (внешний диаметр 59 мм, внутренний – 42 мм). Коронка 1, изготовлена на основе КАМ состава $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$, а коронка 2 – $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$. Для приготовления смесей для образцов КАМ использовали порошок алмаза (АС160Т) зернистостью 315/250 (средний размер зерна $\approx 0,297$ мкм), среднезернистый порошок карбида вольфрама (Украина) со средним размером частиц порошка $\approx 2-8$ мкм), кобальта марки ПК-1у (ГОСТ 9721–79) со средним размером порошка $\approx 2-3$ мкм и диборид хрома (Украина) со средним размером порошка 3–8 мкм. Порошковую смесь для спекания образцов композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ) состава $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ для коронки 1 приготовили таким способом.

Сначала порошки кобальта Со и карбида вольфрама WC в требуемом количестве перемешивали в среде спирта до равномерного смешивания компонентов. Затем к полученной смеси добавляли алмазный порошок и перемешивали в среде спирта до равномерного смешивания компонентов и высушивали в сушильном шкафу. Порошковую смесь для спекания образцов КАМ состава $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ для коронки 2 приготовили другим способом. Сначала порошки CrB_2 и Со в требуемом количестве перемешивали в среде спирта до равномерного смешивания компонентов. После этого к полученной смеси добавляли в требуемом количестве порошок карбида вольфрама WC и перемешивали в среде спирта до равномерного смешивания компонентов.

К полученной смеси добавляли требуемое количество алмазного порошка и перемешивали в среде спирта до равномерного смешивания и высушивали в сушильном шкафу.

Образцы КАМ подвергали ПИС в графитовых пресс-формах. Процесс проходил в вакууме (остаточное давление 6 Па) при нагреве от комнатной температуры до $1350\text{ }^\circ\text{C}$ с шагом $500\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$, давлении 30 МПа и длительности выдержки 3 минуты. Электрические параметры установки: ток 5000 А, напряжение 5 В. Температурный контроль осуществлялся пирометром CHINOIR-АН2, луч которого фокусировался на поверхности графитовой оснастки. Чтобы исключить химическое взаимодействие между графитом и спекаемым материалом, рабочие зоны пресс-формы покрывались смазкой из нитрида бора. Спеченные образцы КАМ крепили к стальным корпусам алмазных коронок 1 и 2 методом пайки.

3.2.2 Исследование закономерностей изнашивания усовершенствованных резцов

Испытания алмазных коронок на износостойкость проводили на специальном стенде, изготовленном на основе радиально-сверлильного станка 2М57 с мощностью двигателя 13 кВт при бурении гранита коростышевского месторождения (Украина) X категории буримости (твердость по штампу 2,37 ГПа, абразивность 43). Стенд оснащен гидравлической системой подачи и системой промывки скважины. Бурение осуществляли в гранитном блоке на глубину 0,5 м за один проход. Для испытания каждой алмазной импрегнированной коронки на износостойкость бурение осуществляли за четыре прохода (проходка на коронку составляла 2 м), что позволяло получать достоверные данные для измерения износа. Бурение гранитных блоков 100×100×500 мм осуществляли при осевой нагрузке 800, 900, 1000, и 1250 кг и частоте вращения 250, 500, 750 и 1250 об/мин.

После испытания режущую часть алмазных коронок промывали этиловым спиртом и высушивали в сушильном шкафу, а после этого взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,01 г. Скорость износа алмазной импрегнированной коронки определяли по формуле [79]:

$$v = \frac{\Delta m}{H}, \quad (3.1)$$

где v – скорость износа алмазной импрегнированной коронки (мг/мм), Δm – потеря массы до и после испытаний (мг), H – проходка на коронку (мм).

Следует отметить, что на рабочей поверхности образца КАМ 25С_{алмаз}–70,5WC–4,5Co в коронке 1 присутствует тонкий слой шлама (продукты разрушения гранита), который трудно смыть (рис. 3.18, а). Из этого рисунка четко видно, что коронка 1 подвергается интенсивному абразивному и адгезионному изнашиванию, о чем свидетельствует наличие разрушенных микроучастков на поверхности КАМ. При этом на рабочей поверхности образца КАМ 25С_{алмаз}–70,5WC–4,5Co образовались достаточно глубокие кольцевые канавки, полости и поры.

На рабочей поверхности КАМ 25С_{алмаз}–66,74WC–4,26Co–4CrB₂ в коронке 2 отсутствуют как разрушенные микроучастки, так и слой шлама (рис. 3.18, б). Это обстоятельство указывает на то, что алмазная импрегнированная коронка 2 более износостойкая по сравнению с коронкой 1.

Уменьшение износа в коронке 2 по сравнению с коронкой 1 связано с формированием в КАМ 25С_{алмаз}–66,74WC–4,26Co–4CrB₂ мелкозернистой структуры твердосплавной матрицы, уменьшением образования графитовых включений в переходной зоне алмаз-матрица и повышением механических свойств [33]. Следует отметить, что на износ породоразрушающих инструментов существенное влияние оказывает нагрузка, частота вращения ω , концентрация и зернистость алмазов, а также способ и технологические режимы спекания КАМ. Представляется важным получить информацию об износостойкости алмазных буровых инструментов в реальных условиях бурения.



Рисунок 3.18 – Режущая поверхность алмазных импрегнированных коронок 1 (а) и 2 (б) после бурения гранита

Зависимости скорости износа v алмазных импрегнированных коронок 1 и 2 от частоты вращения ω при бурении гранитных блоков при нагрузке 1000 кг приведены на рис. 3.19.

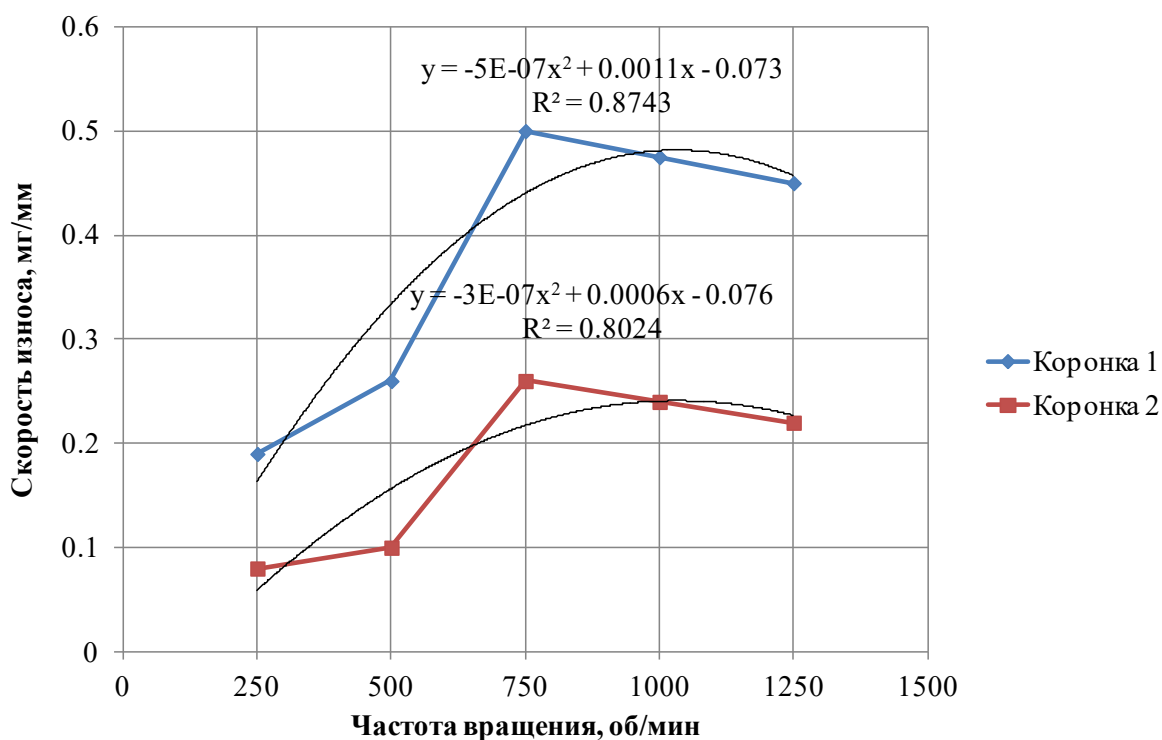


Рисунок 3.19 – Зависимости скорости износа v алмазных импрегнированных коронок 1 и 2 при бурении гранитных блоков от частоты вращения при нагрузке 1000 кг

При этом на зависимостях скорости износа v для коронок 1 и 2 можно выделить три характерных участка (кривые 1, 2 и 3 соответственно). На первом участке при $250 \leq \omega \leq 500$ об/мин наблюдается увеличение v для коронки 1 от 0,19 до 0,26 мг/мм и для коронки 2 – от 0,08 до 0,10 мг/мм. На втором участке при $500 \leq \omega \leq 750$ об/мин наблюдается более заметное увеличение скорости износа v , чем на первом участке. На третьем участке при $750 \leq \omega \leq 1250$ об/мин происходит увеличение скорости износа v с меньшей интенсивностью, чем на втором участке.

Наибольшие значения скорости износа v для коронок 1 и 2 наблюдается при $\omega = 750$ об/мин, а наименьшие – при $\omega = 250$ об/мин. При этом значения v для коронки 2 на каждом участке примерно в 2 раза меньше аналогичных значения для коронки 1.

Уменьшение значений скорости изнашивания в коронке 2 по сравнению с коронкой 1 обусловлено тем, что добавление CrB_2 в состав КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ приводит к увеличению вязкости разрушения K_{Ic} от 9,8 до 14,5 МПа·м^{1/2}, а также к повышению предела прочности при изгибе от 2000 до 2500 МПа и предела прочности при сжатии от 5300 до 5500 МПа за счет модификации структуры (стабильное уменьшение размера зерна карбидной фазы, исчезновение пор на месте связующей фазы Co , образования кластеров фазы ингибитора на межфазных границах), дисперсионного механизма упрочнения и фазового состава КАМ [60, 61].

Зависимости скорости износа v алмазных импрегнированных коронок 1 и 2 от осевой нагрузки (P) при бурении гранитных блоков при частоте вращения 750 об/мин приведено на рис. 3.20.

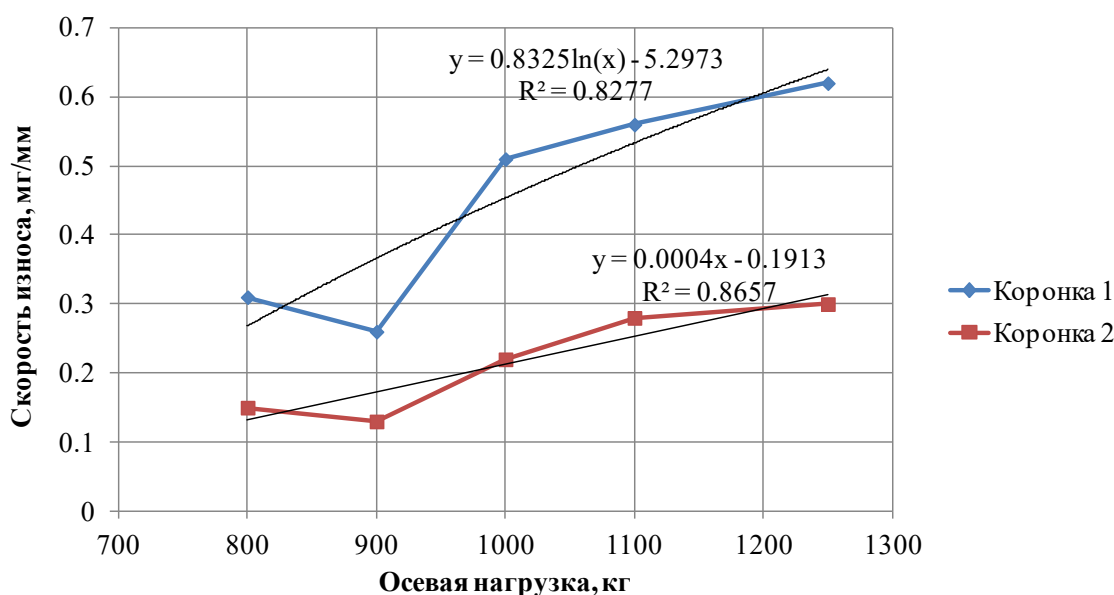


Рисунок 3.20 – Зависимости скорости износа v алмазных импрегнированных коронок 1 и 2 при бурении гранита от осевой нагрузки при частоте вращения $\omega = 750$ об/мин

Из рис. 3.20, видно, что увеличение нагрузки от 800 до 900 кг приводит к незначительному уменьшению скорости износа исследуемых коронок. Значения скорости износа v для коронки 2 в указанном выше диапазоне изменения нагрузки, более 2-х раз меньше скорости износа v для коронки 1. В частности, увеличение P от 900 до 1250 кг приводит к увеличению значений v с 0,25 до 0,64 мг/мм для коронки 1 и с 0,12 до 0,31 мг/мм для коронки 2. Таким образом, увеличение частоты и осевой нагрузки оказывает сильное влияние на износостойкость алмазных импрегнированных коронок при бурении гранита.

Следует отметить, что на износостойкость породоразрушающего инструмента, как уже было показано выше, существенное влияние оказывает прочность сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей. При недостаточной прочности сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей в процессе работы буровых инструментов в результате действия значительных контактных нагрузок и температур происходит выпадение алмазных зерен из твердосплавной матрицы и, как следствие, интенсивное изнашивание композиционных алмазосодержащих материалов. Поэтому важно знать не только механические характеристики твердосплавной матрицы, но и особенности формирования контакта алмазных зерен с матрицей КАМ в процессе их спекания тем или иным методом [78, 79].

Следовательно, добавляя необходимое количество микропорошка диборида хрома CrB_2 в состав образца КАМ $\text{C}_{\text{алмаз}}-(\text{WC}-6\text{Co})$, можно реализовать тройной эффект улучшения механических и эксплуатационных свойств породоразрушающего инструмента, а именно: обеспечить уменьшение размера зерен карбида вольфрама WC в процессе спекания и, как следствие, сформировать однородную мелкозернистую микроструктуру с одной стороны, обеспечить прочное сцепление алмазных зерен с твердосплавной матрицей из другой стороны, уменьшить хрупкость твердосплавной матрицы из третьей стороны, а также обеспечить надежное зажатие алмазных зерен матрицей композита. А это, в свою очередь, позволит эффективно использовать потенциальную возможность алмазных зерен в твердосплавной матрице (противодействовать преждевременному выпадению алмазных зерен из матрицы композиционного алмазосодержащего материала) и тем самым повысить износостойкость и производительность алмазных буровых инструментов различного функционального назначения, а также снизить их себестоимость при бурении прочных и абразивных горных пород.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что использование добавки микропорошка CrB_2 в количестве 4 % (по массе) в составе композита $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ и применение метода искрового плазменного спекания (ПИС) в интервале температуры 20–1350 °С при давлении 30 МПа в течение 3 мин имеет перспективу для производства алмазных буровых инструментов с повышенными механическими и эксплуатационными характеристиками.

Выводы по разделу 3

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Введение в состав композиционного алмазосодержащего материала (КАМ) $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ добавки микропорошка диборида хрома CrB_2 в количестве 4 % обеспечивает снижение значений скорости износа по весу W_R , скорости износа по объему W_V и удельной скорости износа W_S от $8,92 \cdot 10^{-5}$ г/м до $4,54 \cdot 10^{-5}$ г/м, от $8,6980 \cdot 10^{-12}$ м³/с до $3,5717 \cdot 10^{-12}$ м³/с и от $7,16 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м) до $3,9686 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м) соответственно.

2. Уменьшение износа КАМ $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ по сравнению с КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ обусловлено формированием мелкозернистой структуры твердосплавной матрицы, увеличением относительной плотности $\rho_{\text{отн}}$, увеличением сопротивления материала твердосплавной матрицы упругой H/E и пластической H^3/E^2 деформациям, увеличением пределов прочности на изгиб R_{bm} и сжатие R_{cm} и увеличением вязкости разрушения K_{IC} , а также увеличением прочности сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей.

3. При увеличении содержания диборида хрома от 4 до 10 % в составе композита наблюдали увеличение значений W_R , с $4,54 \cdot 10^{-5}$ г/м до $6,44 \cdot 10^{-5}$ г/м, W_V с $3,5717 \cdot 10^{-12}$ м³/с до $5,7087 \cdot 10^{-12}$ м³ и W_S с $3,9686 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м) до $5,3483 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м)). Увеличение значений W_R , W_V и W_S в образце $25C_{\text{алмаз}}-61,1WC-3,9Co-10CrB_2$ по сравнению с образцом $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ обусловлено уменьшением пределов прочности на изгиб R_{bm} и сжатие R_{cm} и вязкости разрушения K_{IC} .

4. Установлены зависимости скорости износа алмазных импрегнированных коронок, изготовленных из КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ и $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ методом ПИС в интервале температуры 20–1350 °С при давлении 30 МПа в течение 3 мин, от частоты вращения и осевой нагрузки при бурении гранита.

5. Добавление микропорошка CrB_2 в количестве 4 % (по массе) в состав КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ приводит к двукратному уменьшению скорости износа. Износостойкость алмазных импрегнированных коронок, изготовленных из КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ и $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$, наиболее высокая при частоте вращения 250 об/мин и осевой нагрузке 900 кг, а наиболее низкая – при частоте вращения 750 об/мин и осевой нагрузке 1250 кг.

6. Увеличение износостойкости алмазной импрегнированной коронки, изготовленной из КАМ $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$, по сравнению с коронкой, изготовленной из КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$, обусловлено, в первую очередь, измельчением зерен, поскольку CrB_2 является ингибитором зерна основной фазы WC при спекании. Во вторых, увеличение износостойкости при введении в состав КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ добавки CrB_2 обусловлено прочным сцеплением алмазных зерен с твердосплавной матрицей.

7. Полученные результаты по износостойкости разработанных композиционных алмазосодержащих материалов и алмазных импрегнированных коронок в

сочетании с мелкозернистой структурой твердосплавной матрицы и высоким алмазоудержанием позволяют их применение для изготовления новых инструментов с повышенными эксплуатационными свойствами для бурения прочных горных пород.

4 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАЗРАБОТАННОГО ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

4.1 Опытные-промышленные испытания бурового долота типа пикобур

Изготовленный лопастной бур был испытан в реальных производственных условиях на месторождении Буденовское при сооружении геотехнологических скважин (Приложения А, Б). На рис. 4.1 представлен геолого-технический наряд для закачной скважины глубиной 670 метров. Проходка велась с использованием пикобура диаметром 161 мм, после чего скважину расширяли до конечного диаметра 190 мм. В состав буровой колонны входили: бурильные трубы с муфтово-замковыми соединениями, УБТ длиной 8 м и диаметром 146 мм, соединительные переходники и разработанное долото типа пикобур. Приводом служила мобильная буровая установка БПУ-1200МК (рис. 4.2). Внешний вид долота типа пикобур перед его спуском в скважину показан на рис. 4.3 [80].

Основными узлами установки являлись буровой станок ЗИФ1200МР, шпиндельный вращатель которого заменен на роторный вращатель, и буровой насос НБ-80. Геологический разрез представлен плотными глинами и песками.

Техническая характеристика долота

Диаметр бурения – 161 мм.

Наружный диаметр опережающего кольцевого вруба – 50 мм.

Количество ступенчатых лопастей – 4.

Обеспечение жесткости конструкции – стальное кольцо, приваренное к нижним ступеням лопастей.

Промывка – центральная, через трубчатый корпус.

Наружный диаметр кольца жесткости – 40 мм.

Количество ступеней на каждой лопасти – 9.

Вооружение лопастей – твердосплавные резцы.

Высота – 240 мм.

Масса – 3,5 кг.

Применяемый состав бурового снаряда: УБТ 89 мм – 7 м; УБТ73мм – 7 м; УБТ63мм – 7 м; ребристая БТ Ø50мм – 10 м; бурильные трубы М350.

Для бурения применялась буровая установка ПБУ-1200МК [80].

Проектная глубина скважины составила 670 м.

Разрез начинается открывается мелкозернистыми песками светло-серого и желтовато-серого цвета. Пески рыхлые, маловлажные в верхней части (до 10–15 м), ниже становятся водонасыщенными. Зерновой состав: преобладает фракция 0,1–0,25 мм, окатанность средняя, минералогический состав – кварц с примесью полевых шпатов и слюды (мусковит, биотит). В интервале 0–30 м встречаются редкие прослои карбонитизированных глин мощностью 0,2–0,8 м – это плотные, но хрупкие разности, при намокании дающие набухание.

С глубины 120 м пески становятся слабо карбонатизированными – карбонат кальция (кальцит) выступает в виде белых пятен и примазок, цементируя отдельные зерна, но связность породы остается низкой. Здесь появляются частые (до 5–7 прослоев на 10 м) линзы карбонатизированных глин темно-серого, почти черного цвета, с раковистым изломом.

Комплекс пород в интервале 150–300 м выделяется высокой степенью насыщения карбонатами – как матрицы, так и цемента. Пески карбонатизированные становятся серовато-белыми, местами слабощементированными до состояния песчаника. Карбонатный цемент базальный или поровый, что придает породе повышенную твердость (категория по буримости IV–V). Прослой карбонатизированных глин – плотные, жирные на ощупь, с включениями микро- и макрокристаллов кальцита, иногда образуют конкреционные стяжения до 5–7 см. Глины часто трещиноватые, трещины заполнены белым кальцитом.

С глубины 210 м и до 300 м начинают преобладать глины (темно-серые, с зеленоватым оттенком), но с частыми (через 1–3 м) прослоями карбонатизированного песка мощностью 0,1–0,5 м. Это создает резкие перепады твердости и абразивности, что приводит к ударным нагрузкам на долото.

В интервале 300–480 м наблюдается классическое горизонтально-слоистое напластование. Мелкозернистые пески кварцевые, с примесью глауконита (зеленые зерна), отсортированные, плотные, с карбонатно-глинистым цементом. Они образуют прослой мощностью от 0,2 до 1,2 м. Между ними залегают глины плотные, аргиллитоподобные, с ровными поверхностями наложения, без видимых карбонатных включений. Глины обладают высокой пластичностью, но при высыхании дают мелкую сеть трещин. Цвет – от серо-коричневого до оливкового.

Мощность глинистых прослоев в среднем 0,5–1,5 м, они выдержаны по простирацию, что позволяет говорить о стабильных условиях седиментации (глубоководный шельф). В песках иногда отмечаются отпечатки раковин и фрагменты углефицированной древесины – биотурбация слабая.

Разрез в интервале 400–480, представлен глинами плотными, горизонтально сложенными, без видимых песчаных прослоев. Глины темно-серые, почти черные, с синеватым отливом на свежем скола. Текстура массивная или тонкослоистая (слоистость выражена чередованием глинистого и алевроитового материала). В изломе – полураковистый, ровный. Минералогический состав: иллит, каолинит, небольшое количество монтмориллонита (до 5–7%), что обеспечивает низкую набухаемость, но высокую липкость при намокании.

Плотность породы в естественном залегании достигает 2,2–2,4 г/см³, пористость менее 5%. Прочность на одноосное сжатие (оценка по буримости) соответствует V–VI категории. В интервале 430–460 м встречена зона микротрещиноватости, заполненная кальцитом (мощность зоны ~1,2 м), где прочность падает на 15–20%, что может вызвать отклонение долота. Отсутствие песчаных прослоев делает разрез однородным, что благоприятно для стабильного бурения.

Интервал 490–540 м представлен мелкозернистыми песками светло-серого и желтовато-серого цвета. Пески рыхлые, в верхней части маловлажные, ниже – водонасыщенные. Ниже по разрезу они сменяются среднезернистыми песками с прослоями разнозернистых разностей и отдельными обрывками песчаников. Зерновой состав преимущественно кварцевый, с примесью полевых шпатов. Окатанность зерен средняя. Отмечается горизонтальная и волнистая слоистость.

В интервале 540–550 м залегает выдержанный прослой глины темно-серого цвета, плотной, пластичной. Интервал 550–570 м снова представлен среднезернистыми песками с прослоями разнозернистых песков и маломощными (0,1–0,5 м) прослоями глин. Пески имеют более пестрый состав, местами наблюдается слабая карбонатизация в виде примазок и пятен.

Ниже (примерно 570–610 м) продолжается толща среднезернистых песков с прослоями мелкозернистых, реже разнозернистых с гравием. Характерно появление прослоев глин мощностью до 1,5 м. Пески в этом интервале становятся более плотными, местами слабо сцементированными карбонатно-глинистым цементом. Отмечается увеличение количества гравийной примеси.

В интервале 610–620 м выделяется слой разнозернистых песков с гравием (гравийно-песчаная разность). Порода более грубозернистая, плохо отсортированная, с включениями мелкого гравия и гальки.

Интервал 620–670 м представлен преимущественно среднезернистым песком кварцевого состава, относительно хорошо отсортированным, с редкими прослоями разнозернистых песков. В нижней части разрез продолжает оставаться песчаным – разнозернистые пески с прослоями среднезернистых разностей.

Параметры технологического режима бурения поддерживались в следующем диапазоне:

Осевая нагрузка – 5 кН;

Частота вращения пикобура – 136; 288 об/мин;

Расход бурового раствора – 200 л/мин.

Наиболее часто применяемые параметры раствора: плотность – 1,22–1,25 г/см³; вязкость – 22–24 сек, водоотдача – 15–20 см³ за 30 мин: содержание песка – менее 4% [81].

Механическая скорость бурения изменялась от 16–18 час (как правило, в верхних интервалах) до 10–12 м/час с постепенным снижением в конце интервала 320–400 м до 5 м/час. Испытуемый пикобур показал достаточную производительность и повышенную стойкость (пройдено 436 м вместо 350 м известными долотами) его следует принять к внедрению при бурении верхних интервалов скважин (ориентировочно 0–450 м).

Разместить кольцо жесткости с керноломом на расстоянии 10 мм от забоя вместо 20 мм в испытываемом пикобуре, что позволит снизить изгибающие нагрузки на врубные твердосплавные резцы и продолжить бурение.

В дальнейшем рекомендовать создать комбинированный буровой инструмент с комбинированным твердосплавным качественным PDC – вооружением для проходки скважин глубиной 600–650 м за один рейс без подъема бурового снаряда на поверхность.

Тем не менее, в среднем проходка, показанная при испытаниях экспериментальных долот, оказалась выше на 20 %, чем в среднем у серийных буровых долот. Для улучшения конструкции долота ПК-2 рекомендовано обеспечить надежное закрепление твердосплавных резцов на лопастях и выпустить опытную партию инструментов в количестве 10 штук, а также провести сдаточные испытания с расчетом реального экономического эффекта.

ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИЙ НАРЯД на сооружение откачной скважины, блок № _____

- | | | | |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|--|
| 1. Буровая установка _____ | 4. Проектная глубина _____ | 6. Скважина начата «__» _____ 20__ | |
| 2. Вышка, мачта _____ | _____ | г. | |
| 3. Бурильные трубы _____ | 5. Углы заложения: | 7. Скважина окончена «__» _____ | |
| | - азимутальный _____; | 20__ г. | |
| | - зенитный _____; | | |

Геологическая часть					Техническая часть														
Глубина, м	Геологическая колонка	Краткая характеристика пород	Мощность слоя, м	Проектное положение фильтра		Интервал гидроизоляции гравийной обсыпкой	Конструкция скважины	Компановка бурового снаряда	Частота вращения шпинд., об/мин.	Осевое давление, МПа (кг)	Вид, параметры промыв. жидкости, л/мин. давл. кгс/см	Примечание							
				от	до														
30		Пески мелкозернистые карбонатизированные с прослоями карбонатизированных глин	30					При бурении пилот-скважины в интервале 0-490 м. 3-х лопастной пилобур $\phi=161$ мм, УБТ-89 мм, 8-12 м, УБТ-73 мм, 8-12. СБТМ-50	При бурении пилот-скважины в интервале 0-400 м, 231-288 об/мин. При разбурке 136-288 (2-4 ск.)	При бурении пилот-скважины в интервале 0-490 м, P=400-500 кгс. При разбурке – вес бурового снаряда	Глинистый раствор $g=1,18-1,20$ г/см ³ . T=22-24 сек. V=15-20 см ³ за 30 мин. $\rho=20-30$ Тех. вода $g=1,0-1,05$ г/л. 200-250 л/мин. $\rho=40-50$	1. Отклонение скважины не более 1 метра на 100 м. 2. Интервал установки фильтров и цементного моста задают геологи по данным каротажа. Допустимое отклонение фактического интервала посадки фильтра от заданного 1 м. 3. Верхняя часть фильтровой колонны выполняется фильтрами КДФ-118. Соотношение фильтров разной скважности задается дополнительно по данным каротажа. 4. Резьбовые соединения обсадных труб при обсадке смазывать клеем «Тангит». 5. После обсадки производится токовый каротаж на правильность установки фильтров и целостность колонны. 6. Гидроизоляция затрубного пространства гелецементным раствором в интервале 50-540 м. Интервал 0-10 м использовать миколит. 7. Цементация в интервалах 280-330 м и 540-580 м. Интервалы цементации могут варьироваться по усмотрению геолога. 8. При самоизливе применять утяжеленный глинистый раствор удельным весом 1,25-1,27 г/см ³ .							
100		Глины карбонатизированные с прослоями песка	-																
300																			
350		Пески мелкозернистые	50		Возможен самоизлив														
400		Глины плотные горизонтально слоистые																	
450																			
480																			
490		Пески мелкозернистые	20		Возможен самоизлив														
500																			
510		Пески среднезернистые с прослоями разнозернистых, прослоями и обрывками песчаников																	
520																			
530																			
540		Глина																	
550		Пески среднезернистые с прослоями разнозернистых песков и маломощными прослоями глин																	
560																			
570		Глина																	
580																			
590																			
600																			
610		Пески среднезернистые с прослоями мелкозернистых, реже разнозернистых с гравием песков. Отмечаются прослои глин до 1,5 м																	
620		Пески разнозернистые с гравием, гравий песчаный																	
670		Песок среднезернистый																	
		Пески разнозернистые с прослоями среднезернистых песков																	

Рисунок 4.1 – Геолого-технический наряд на сооружение закачной геотехнологической скважины (месторождение Буденовское) [82]

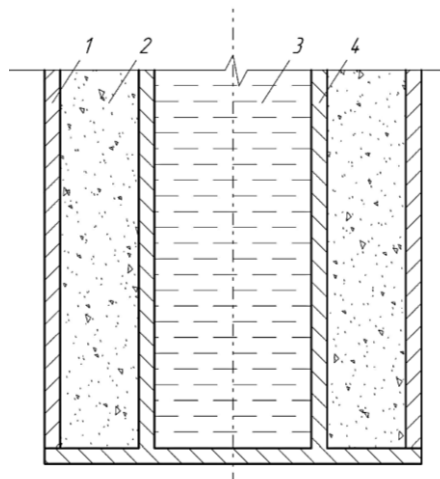


Рисунок 4.2 – Буровая установка БПУ-1200МК



Рисунок 4.3 – Буровое долото типа пикообраз перед спуском в скважину [15]

После завершения испытаний пикообразного долота диаметром 161 мм работы были переведены на этап освоения скважины. В процессе освоения одной из первоочередных задач является установка фильтра в интервале продуктивного пласта. Для этих целей был применен разработанный авторами гравийный фильтр блочного типа [83-87], схема которого приведена на рис. 4.3 и реализованный по патенту № 37967 (Приложение Г). Использование данного фильтра в процессе освоения скважины показало высокую эффективность и улучшенные фильтрационные характеристики.



1 – наружный съемный каркас формы; 2 – полимерно-гравийный композит; 3 – охлаждающий агент; 4 – внутренний каркас формы.

Рисунок 4.4 – Блочный гравийный фильтр

4.2 Расчет ожидаемого эффекта от внедрения разработанного бурового долота типа пикобур

Для оценки экономической эффективности применения нового бурового долота типа пикобур (заявка № 2026/0801.2) выполнено сравнение с серийным четырехлопастным гидромониторным пикобуром конструкции АО «Волковгеология». Расчет проведен применительно к буровой установке 1200МК, используемой при геологоразведочном бурении. В основу расчета положены типичные производственные показатели бурения и консервативные предположения относительно повышения механической скорости и стойкости долота.

Экономическая эффективность определяется по трем основным направлениям:

- снижение затрат на один метр бурения;
- экономия от увеличения проходки на одно долото;
- сокращение времени бурения и количества спуско-подъемных операций, что повышает производительность бурового станка.

Исходные данные

Таблица 4.1 – Технические и экономические параметры бурения

Показатель	Обозначение	Значение
Буровая установка		1200МК
Коммерческая производительность станка	Q_m	3000 м/мес
Стоимость одного станко-часа	C_h	35 000 тг/ч
Стоимость стандартного пикобура	C_1	180 000 тг
Стоимость нового долота	C_2	220 000 тг
Механическая скорость бурения стандартным долотом	V_1	8,0 м/ч
Механическая скорость бурения новым долотом	V_2	8,8 м/ч
Проходка на одно стандартное долото	L_1	100 м
Проходка на одно новое долото	L_2	120 м
Время замены одного долота	t_{tr}	2,5 ч

Себестоимость долота на один метр бурения

Себестоимость долота на один метр определяется отношением стоимости долота к его проходке.

Для стандартного пикобура:

$$S_{d1} = \frac{C_1}{L_1} = \frac{180000}{100} = 1800 \text{ тг/м} \quad (4.1)$$

Для нового долота:

$$S_{d2} = \frac{C_2}{L_2} = \frac{220000}{120} = 1833 \text{ тг/м} \quad (4.2)$$

Разница в себестоимости составляет:

$$\Delta S_d = S_{d2} - S_{d1} = 1833 - 1800 = 33 \text{ тг/м} \quad (4.3)$$

Таким образом, увеличение стоимости долота на один метр бурения незначительно и составляет всего 33 тг/м.

Затраты времени на бурение одного метра

Время бурения одного метра определяется как величина, обратная механической скорости бурения.

Для стандартного долота:

$$t_1 = \frac{1}{V_1} = \frac{1}{8} = 0,125 \text{ тг/м} \quad (4.4)$$

Для нового долота:

$$t_2 = \frac{1}{V_2} = \frac{1}{8,8} = 0,1136 \text{ тг/м} \quad (4.5)$$

Экономия времени на один метр бурения:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 0,125 - 0,1136 = 0,0114 \text{ ч/м} \quad (4.6)$$

Экономия эксплуатационных затрат на один метр бурения

Экономия эксплуатационных затрат обусловлена сокращением времени работы бурового станка.

$$E_i = \Delta t \cdot C_h = 0,0114 \cdot 35000 = 399 \text{ тг/м} \quad (4.7)$$

Чистая экономия на один метр бурения с учетом увеличения стоимости долота:

$$E_m = E_i - \Delta S_d = 399 - 33 = 366 \text{ тг/м} \quad (4.8)$$

Следовательно, применение нового долота обеспечивает экономию 366 тг на каждый метр бурения.

Экономический эффект от повышения стойкости долота

Количество долот, необходимое для бурения месячного объема 3000 м:

Для стандартного долота:

$$N_1 = \frac{3000}{100} = 30 \text{ долот} \quad (4.9)$$

Для нового долота:

$$N_2 = \frac{3000}{120} = 25 \text{ долот} \quad (4.10)$$

Сокращение потребности в долотах составляет:

$$\Delta N = N_1 - N_2 = 30 - 25 = 5 \text{ долот} \quad (4.11)$$

Стоимость комплекта стандартных долот:

$$K_1 = N_1 \cdot C_1 = 30 \cdot 180000 = 5400000 \text{ тг} \quad (4.12)$$

Стоимость комплекта новых долот:

$$K_2 = N_2 \cdot C_2 = 25 \cdot 220000 = 5500000 \text{ тг} \quad (4.13)$$

Разница в затратах на долотный инструмент:

$$\Delta K = K_2 - K_1 = 5500000 - 5400000 = 100000 \text{ тг} \quad (4.14)$$

Несмотря на более высокую стоимость нового долота, увеличение проходки позволяет практически полностью компенсировать эту разницу.

Экономия времени бурения на месячный объем работ

Общее время бурения 3000 м стандартным долотом:

$$T_1 = \frac{3000}{8} = 375 \text{ ч} \quad (4.15)$$

Общее время бурения новым долотом:

$$T_2 = \frac{3000}{8,8} = 340,9 \text{ ч} \quad (4.16)$$

Экономия времени:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 375 - 340,9 = 34,1 \text{ ч} \quad (4.17)$$

Экономия эксплуатационных расходов за счет сокращения времени бурения:

$$E_{exp} = \Delta T \cdot C_h = 34,1 \cdot 35000 = 1193500 \text{ ч} \quad (4.18)$$

Экономия от сокращения спуско-подъемных операций

Сокращение числа замен долота уменьшает время спуско-подъемных операций. Экономия времени на СПО:

$$T_{tr} = \Delta N \cdot t_{tr} = 5 \cdot 2,5 = 12,5 \text{ ч} \quad (4.19)$$

Экономия средств:

$$E_{tr} = T_{tr} \cdot C_h = 12,5 \cdot 35000 = 437500 \text{ ч} \quad (4.20)$$

Общий месячный экономический эффект

Суммарный экономический эффект определяется как сумма экономии эксплуатационных затрат и экономии от сокращения СПО за вычетом разницы в стоимости долот.

$$E_{month} = E_{exp} + E_{tr} - \Delta K \text{ ч} \quad (4.21)$$

Подставляя значения:

$$E_{month} = 1193500 + 437500 - 100000 = 1531000 \text{ тг} \quad (4.22)$$

Экономическая эффективность на один метр бурения и на одно долото
Экономический эффект на один метр бурения:

$$E_{1m} = \frac{E_{month}}{Q_m} = \frac{1531000}{3000} = 510 \text{ тг} \quad (4.23)$$

Экономический эффект на одно новое долото:

$$E_{bit} = \frac{E_{month}}{N_2} = \frac{1531000}{25} = 61240 \text{ тг} \quad (4.24)$$

Сведем полученные результаты в табл. 4.2

Таблица 4.2 – Итоговые результаты

Показатель	Значение
Экономия на 1 м бурения	510 тг/м
Экономический эффект на одно долото	61,2 тыс. тг
Экономический эффект на станок в месяц	1,53 млн тг/мес
Повышение механической скорости бурения	10 %
Повышение проходки на долото	20 %
Сокращение времени бурения 3000 м	34,1 ч
Сокращение времени СПО	12,5 ч

Выводы по разделу 4

1. Опытно-промышленные испытания бурового долота типа пикобур (заявка № 2026/0801.2), проведенные в условиях месторождения Буденовское, подтвердили работоспособность и эффективность предложенной конструкции при бурении геологоразведочных скважин.

2. В ходе испытаний установлено, что применение нового долота обеспечивает более эффективное разрушение горной породы и улучшение очистки забоя по сравнению со стандартным четырехлопастным гидромониторным пикобуром конструкции АО «Волковгеология». Это способствует повышению механической скорости бурения и увеличению проходки на одно долото.

3. Результаты испытаний показали увеличение механической скорости бурения на 10-14 % и повышение стойкости долота, выражающееся в увеличении проходки на одно долото на около 20 %. Благодаря этому снижается количество замен долот в процессе бурения и сокращаются непроизводительные затраты времени на выполнение спуско-подъемных операций.

4. На основании полученных производственных показателей выполнена оценка экономической эффективности внедрения новой конструкции долота. Расчеты показали, что экономический эффект от применения долота типа пикобур составляет около 510 тенге на один метр бурения и около 61 тыс. тенге на одно долото. При коммерческой производительности буровой установки БПУ-1200МК на уровне 3000 м в месяц суммарный экономический эффект достигает 1,53 млн тенге на один буровой станок в месяц.

5. Применение разработанного фильтра подтвердило его высокую эффективность и улучшенные фильтрационные характеристики в процессе освоения скважины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате выполненного исследования обоснованы конструктивные параметры бурового долота с комбинированным вооружением с высокими эксплуатационными характеристиками в условиях литологически неоднородного и трещиноватого разреза при бурении геотехнологических скважин. По результатам выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1.1 Проведен анализ существующих конструкций лопастных долот. Установлены основные достоинства и недостатки долот с твердосплавным и PDC вооружением. Выявлена низкая эффективность в литологически неоднородных и трещиноватых геологических разрезах.

1.2 Установлена недостаточная эффективность существующих долот и технологий бурения скважин в условиях месторождения Буденовское, когда верхняя часть разреза сложена мягкими породами, а нижняя более твердыми трещиноватыми породами.

1.3 Сформулированы требования, которым должны отвечать буровые долота для успешного бурения скважин в условиях бурения литологически неоднородных и трещиноватых разрезов.

1.4 Установлено, что основная причина эффекта «зависания» пикобуров – концентрированная осевая нагрузка на центральных резцах и накопление керна вблизи оси вращения, что нарушает равномерность углубки и требует дополнительных конструктивных мероприятий.

1.5 Изложены оригинальные методики для приготовления алмазосодержащих смесей с равномерным смешиванием компонентов, определения шероховатости поверхности, твердости и модуля упругости, износа образцов КАМ и инструментов, изготовленных на их основе. Доверительные оценки уравнений регрессии, полученных после реализации матрицы планирования, осуществляли по критериям Фишера, Стьюдента, Пирсона. Это позволило с большей точностью установить важнейшие физические и технологические параметры, влияющие на структуру, механические свойства и износ КАМ, а также износостойкость инструментов, изготовленных на их основе, в процессе бурения прочных и абразивных горных пород.

1.6 Введение в состав КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ добавки микропорошка диборида хрома CrB_2 в количестве 4 % обеспечивает снижение значений скорости износа по весу W_R , скорости износа по объему W_V и удельной скорости износа W_S от $8,92 \cdot 10^{-5}$ г/м до $4,54 \cdot 10^{-5}$ г/м, от $8,6980 \cdot 10^{-12}$ м³/с до $3,5717 \cdot 10^{-12}$ м³/с и от $7,16 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м) до $3,9686 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м) соответственно.

1.7 Уменьшение износа КАМ $25C_{\text{алмаз}}-66,74WC-4,26Co-4CrB_2$ по сравнению с КАМ $25C_{\text{алмаз}}-70,5WC-4,5Co$ обусловлено формированием мелкозернистой структуры твердосплавной матрицы, увеличением относительной плотности $\rho_{\text{отн}}$ и улучшением прочности сцепления алмазных зерен с твердосплавной матрицей.

1.8 При увеличении содержания диборида хрома от 4 до 10 % в составе композита наблюдали увеличение значений W_R , с $4,54 \cdot 10^{-5}$ г/м до $6,44 \cdot 10^{-5}$ г/м, W_V с $3,5717 \cdot 10^{-12}$ м³/с до $5,7087 \cdot 10^{-12}$ м³ и W_S с $3,9686 \cdot 10^{-13}$ м³/(Н·м) до $5,3483 \cdot 10^{-13}$

$\text{м}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$). Увеличение значений W_R , W_V и W_S в образце $25\text{C}_{\text{алмаз}}-61,1\text{WC}-3,9\text{Co}-10\text{CrB}_2$ по сравнению с образцом $25\text{C}_{\text{алмаз}}-66,74\text{WC}-4,26\text{Co}-4\text{CrB}_2$ обусловлено повышенной хрупкостью твердосплавной матрицы и ухудшением алмазоудержания.

1.9 Установлены зависимости скорости износа алмазных импрегнированных коронок, изготовленных из КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ и $25\text{C}_{\text{алмаз}}-66,74\text{WC}-4,26\text{Co}-4\text{CrB}_2$ методом плазменно-искрового спекания (ПИС) в интервале температуры 20–1350 °С при давлении 30 МПа в течение 3 мин, от скорости вращения и осевой нагрузки при бурении гранита.

1.10 Добавление микропорошка CrB_2 в количестве 4 % (по массе) в состав КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ приводит к двукратному увеличению износостойкости при бурении прочных и абразивных горных пород. Износостойкость алмазных импрегнированных коронок, изготовленных из КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ и $25\text{C}_{\text{алмаз}}-66,74\text{WC}-4,26\text{Co}-4\text{CrB}_2$, наиболее высокая при частоте вращения 250 об/мин и осевой нагрузки 900 кг, а наиболее низкая – при частоте вращения 750 об/мин и осевой нагрузке 1250 кг.

1.11 Увеличение износостойкости алмазной импрегнированной коронки, изготовленной из КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-66,74\text{WC}-4,26\text{Co}-4\text{CrB}_2$, по сравнению с коронкой, изготовленной из КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$, обусловлено, в первую очередь, измельчением зерен, поскольку CrB_2 является ингибитором зерна основной фазы WC при спекании. Во-вторых, увеличение износостойкости при введении в состав КАМ $25\text{C}_{\text{алмаз}}-70,5\text{WC}-4,5\text{Co}$ добавки CrB_2 обусловлено прочным сцеплением алмазных зерен с твердосплавной матрицей.

2. Поставленные задачи исследования полностью выполнены. Кроме того, подана заявка на полезную модель нового бурового инструмента.

3. Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов исследования:

3.1 Разработанные КАМ $\text{C}_{\text{алмаз}}-(\text{WC}-\text{Co})-\text{CrB}_2$ методом плазменно-искрового спекания использованы в технологии изготовления методом плазменно-искрового спекания инструментов с повышенными механическими и эксплуатационными характеристиками для бурения геотехнологических скважин в литологически неоднородных и трещиноватых горных породах. При этом необходимо соблюдать строгое соотношение концентраций компонентов, поскольку превышение порогового значения концентрации CrB_2 вызывает ухудшение механических свойств твердого сплава WC–6Co.

3.2 Сформированные методом плазменно-искровым спеканием КАМ $\text{C}_{\text{алмаз}}-(\text{WC}-\text{Co})-\text{CrB}_2$ и разработанные на их основе буровые инструменты различного функционального назначения с высокими показателями рабочих характеристик обеспечивает существенную экономическую выгоду не только за счет снижения энергопотребления (значительного уменьшения времени спекания) в процессе спекания, но и за счет снижения стоимости композитов.

3.3 Выяснение причин «зависания» лопастного долота позволило разработать лопастной пикобур с твердосплавным вооружением, у которого в околоосевой области вращения отсутствуют режущие элементы. В результате появилось

возможность более рационально распределить осевую нагрузку на лопасти долота. Испытания нового инструмента показали, самую высокую проходку (на 30–40%) в сравнении с применяющимися лопастными пи-кобурами с твердосплавным вооружением.

3.4 Разработан комбинированной лопастной пикобур с комбинированным твердосплавным и PDC вооружением для его массового применения при разведке и добыче уранового сырья. При этом использована особенность геологического разреза урановых месторождений: с поверхности до глубины 300–350 м залегают мягкие породы, в которых при бурении используется твердосплавное вооружение пикобура, а далее до проектной глубины скважины, где залегают более твердые породы – применяется уже тот же пикобур с PDC вооружением.

4. Оценка технико-экономической эффективности внедрения:

Результаты испытаний показали увеличение механической скорости бурения на 10-14 % и повышение стойкости долота, выражающееся в увеличении проходки на одно долото на около 20 %. Благодаря этому снижается количество замен долот в процессе бурения и сокращаются непроизводительные затраты времени на выполнение спуско-подъемных операций. На основании полученных производственных показателей выполнена оценка экономической эффективности внедрения новой конструкции долота. Расчеты показали, что экономический эффект от применения долота типа пикобур составляет около 510 тенге на один метр бурения и около 61 тыс. тенге на одно долото. При коммерческой производительности буровой установки БПУ-1200МК на уровне 3000 м в месяц суммарный экономический эффект достигает 1,53 млн тенге на один буровой станок в месяц.

5. Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.

Выполненные исследования и полученные результаты соответствуют лучшим достижениям в области бурения геотехнологических скважин относительно большим диаметром в условиях литологически неоднородного и трещиноватого разреза.

Научные результаты работы используются при обучении студентов, магистрантов и докторантов на кафедрах Каспийского государственного университета технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова и Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Язиков В.Г., Забазнов В.Л., Петров Н.Н., Рогов Е.И., Рогов А.Е. Геотехнология урана на месторождениях Казахстана. – Алматы, 2001.
- 2 Кононов В.М., Крысенко А.М., Швец В.М. Основы геологии, гидрогеологии и инженерной геологии. – М.: Высш. шк. 1978.
- 3 Максимов В.М. Справочное руководство гидрогеолога: в 1 т. – М.: Недра. 1967. – 365 с.
- 4 Аренс В.Ж., Гайдин А.П. Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических методов добычи полезных ископаемых. – М.: Недра, 1978. - 215 с.
- 5 Аренс В.Ж. Скважинная добыча полезных ископаемых (геотехнология). – М.: Недра, 1986. - 279 с.
- 6 Аренс В.Ж., Бабичев Н.И., Башкатов А.Д., Гридин О.М., Хрулев А.С., Хчян Г.Х. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. - М.: Горная книга, 2007. - 295 с.
- 7 Сушко С.М, С.Д Дауренбаев, Касенов А.К, Б.В Федоров «Технология и техника сооружения геотехнологических скважин при подземном выщелачивании урана». – Алматы: Изд. Искандер, 2007.
- 8 Сушко С.М, Касенов А.К, А.М Мусанов «Бурение и оборудование геотехнологических скважин». – Алматы: Изд. Центр КазНТУ, 2010.
- 9 Ракишев Б.Р., Федоров Б.В. Техника и технология сооружения геотехнологических скважин. - Алматы: КазНТУ, 2013. – 355 с.
- 10 Powder. L., Fedorenko V., Litovchenko V., Naumov D., Korbutyak V. Yuhymchuk A., Gudymenko O., Dubikovskiy N., Mimura A.M. Exciton-Assisted UV Stimulated Emission with Incoherent Feedback in Polydisperse Crystalline ZnO. – 2022. - №12. – 1705 p. <https://www.mdpi.com/journal/coatings>
- 11 Ратов Б. Т., Федоров Б. В., Мечник В. А., Бондаренко Н. А., Waldemar Samociuk, Zbigniew Krzysiak, Геворкян Е.С., Куттыбаев А. Е., Калжанова А. Б., Утепов З., Коростышевский Д.Л. Повышение эксплуатационных характеристик буровых долот за счет совершенствования их конструкции и применения новых алмазосодержащих материалов / Монография. Satbayev University. – Алматы: 2024. – 200 с. ISBN 978-601-323-508-0.
- 12 Ratov B.T., Khomenko V.L., Kuttybayev A.E., Togizov K.S., Uteпов Z.G. (2024). Innovative drill bit to improve the efficiency of drilling operations at uranium deposits in Kazakhstan // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences. -2024. – Vol. 4, № 466 (2024). – P.224–236. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.43>.
- 13 Сейдалиев А.А., Калжанова А.Б., Гусманова А., Ратов Б.Т., Куттыбаев А.Е., Сарбопеева М.Д., Утепов З.Г. Оптимизация эксплуатационных свойств бурового инструмента с алмазосодержащими элементами // Журнал Нефть и Газ, 2025. - № 2(146). - С.42-52. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2025-2.03>.
- 14 Ratov B.T., Khomenko V.L., Uteпов Z.G., KoroviakaYe.A., Seidaliyev A.A. Blade bit drilling in Kazakhstan: Achieved results, unresolved issues // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and

technical sciences. - 2025. – Vol. 1, №469 (2025). – P. 182–201. <https://doi.org/10.32014/2025.2518-170X.484>

15 Билецкий М.Т., Ратов Б.Т., Утепов З.. - Сейдалиев А.А. Решение о выдаче патента на полезную модель «Буровое долото типа пикобур»: заявка № 2026/0801.2; дата подачи 30.01.2025; решение от 22.05.2026 г. – Казахстан, 2026.

16 Chon K.S., Takahashi H., Namba Y. Wear inspection of a single-crystal diamond tool used in electroless nickel turning // *Optical Engineering*. - 2014. - Vol. 53. – 034102 p.

17 Miller D., Ball A. The wear of diamonds in impregnated diamond bit drilling. // *Wear*. -1991. - Vol. 141. - P. 311–320.

18 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 // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2021. - Vol. 98. – 105530 p.

19 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 // *Mechanical Sciences*. - 2022. - Vol. 13, № 2. - P. 867–875.

20 He M., Li N., Zhu J., Chen Y. Advanced prediction for field strength parameters of rock using drilling operational data from impregnated diamond bit // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. - 2020. - Vol. 187. art. 106847.

21 Rafid K. Abbas. A review on the wear of oil drill bits (conventional and the state of the art approaches for wear reduction and quantification) // *Engineering Failure Analysis*. - 2018. - Vol. 90. - P. 554–584.

22 Pirmohammadi P., Zakeri M., Razavi M., Nikzad L. Effect of diamond volume fraction on the microstructure and mechanical properties of SPS WC–Co/diamond composite // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. - 2024. - Vol. 21, №2. - P. 1022–1031.

23 Ratov B., 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 // *Machines*. - 2023. - Vol. 11, №4. – 453 p.

24 Tyrala D., Romanski A., Konstany 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.

25 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 Proceedings*. - 2011. - №2. - P. 18–24.

26 Ratov B.T., Mechnik V.A., Bondarenko M.O., Kolodnitskyi V.M. Physical and mechanical properties of WC–Co–CrB₂ matrices of composite diamond-containing materials sintered by vacuum hot pressing for drilling tool applications // *Journal of Superhard Materials*. - 2022. - Vol. 44, №4. - P. 240–251.

27 Wang X., Hwang K.S., Koopman M., Fang Z.Z., Zhang L. Mechanical properties and wear resistance of functionally graded WC–Co. // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2013. - Vol. 36. - P. 46–51.

- 28 Tarrado J. M., Roa J. J., Valle V., Marshall M. J., Lanes L. Fracture and fatigue behavior of WC–Co and WC–Co, Ni cemented carbides // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2015. - Vol. 49, № 3. -P. 184–191.
- 29 Renato Pero, Giovanni Maizza, Roberto Montanari, Takahito Ohmura. Nano-indentation properties of tungsten carbide-cobalt composites as a function of tungsten carbide crystal orientation // *Materials*. - 2020. - Vol. 13, №9. - 2137 p.
- 30 Tyrala D., Romanski A., Konstany J. The effects of powder composition on microstructure and properties of hot-pressed matrix materials for sintered diamond tools // *Journal of Petroleum Science and Engineering*.- 2020. - Vol. 29. - P. 1467–1472.
- 31 Konstany J., Romanski A. New nanocrystalline matrix materials for sintered diamond tools. *Materials Sciences and Applications*. - 2012. - Vol. 3, №11. - P. 779–783.
- 32 Chen Yuqi, Li Liang, Ma Shibang, Li Chao, Zheng Songhao, Lv Wucheng, Wang Libo, Zhou Aiguo, Wang Xing. Preparation of $Ti_3Si_{0.8}Al_{0.2}C_2$ bonded diamond composites and their friction properties coupled with different counterfaces // *Advances in Materials Science and Engineering*. - 2023.
- 33 Yang, Y., Luo, L.M., Zan, X., Zhu, X.Y., Zhu, L., Wu, Y.C. Synthesis of Y_2O_3 -doped WC–Co powders by wet chemical method and its effect on the properties of WC–Co cemented carbide alloy // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2020. - Vol. 92. – 105324 p.
- 34 Ponomarev S. S., Shatov A. V., Mikhailov A. A., Firstov S. A. Carbon distribution in WC-based cemented carbides // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2015. - Vol. 49, №3. - P. 42–56.
- 35 Lihui Z., Kun L., Zhilin L. Study on the hardening and toughening mechanisms of WC–Co cemented carbides with plate-like WC grains // *Rare Metal Materials and Engineering*. - 2011. - Vol. 40.- P. 443–446.
- 36 Li Z., Zhu L. Microstructure and properties of WC–10%Co cemented carbides with plate-like WC grains // *Journal of Central South University (Sci. Technol.)*. 2010. - Vol. 41.- P. 521–525.
- 37 Bondarenko N.A., Mechnik V.A. Drilling oil and gas wells by ISM diamond tools // *SOCAR Proceedings*. - 2012. - №3.- P. 6–12.
- 38 Han Y., Zhang S., Bai R., Zhou H., Su Z., Wu J., Wang J. Effect of nanovanadium nitride on microstructure and properties of sintered Fe–Cu-based diamond composites // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* -2020. -Vol. 91. – 105256 p.
- 39 Ratov B.T., Mechnik V.A., Gevorkyan E., Matijosius J., Kolodnitskyi V.M., Chishkala V.A., Kuzin N.O., Siemiatkowski Z., Rucki M. Influence of CrB_2 additive on the morphology, structure, microhardness and fracture resistance of diamond composites based on WC–Co matrix // *Materialia*. - 2022. - Vol. 25. – 101546 p.
- 40 de Oliveira L. J., Cabral S. C., Filgueira M. Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* - 2012. -Vol. 35, №4. - P. 228–234.

- 41 Pirmohammadi P., Zakeri M., Razavi M., Nikzad L. Effect of SPS frequency on the transformation of diamond to graphite in WC-Co composite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2024. Vol. 119. P. 106496.
- 42 Yin C., Peng Y., Ruan J., Zhao L., Zhang R., Du Y. Influence of Cr_3C_2 and VC content on WC grain size, WC shape and mechanical properties of WC–6.0Co wt.% Co cemenred carbides // *Materials*. - 2021. - Vol. 14. – 1551 p.
- 43 Ponomarev S. S., Shatov A. V., Mikhailov A. A., Firstov S. A. Carbon distribution in WC-based cemented carbides // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* - 2015. Vol. 49, №3. - P. 42–56.
- 44 Zheng-Yang Hu, Zhao-Hui Zhang, Xing-Wang Cheng, Fu-Chi Wang, Yi-Fan Zhang, Sheng-Lin Li. A review of multi-physical fields induced phenomena and effects in spark plasma sintering: Fundamentals and applications // *Materials and Design*. - 2020. -Vol. 191. -108662 p.
- 45 Tokita M. Progress of Spark Plasma Sintering (SPS) Method, Systems, Ceramics Applications and Industrialization // *Ceramics*. - 2021. - Vol. 4, №2. - P. 160-198.
- 46 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. - 105337 p.
- 47 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.
- 48 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 // *Sverkhtrverdye Materialy*. - 2004. - Vol. 26, №6. - P. 3–15.
- 49 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 $\text{C}_{\text{diamond}}\text{--VK6}$ and $\text{C}_{\text{diamond}}\text{--}(\text{VK6--CrB}_2\text{--W}_2\text{B}_5)$ // *Fizicheskaya Mezomekhanika*. - 2005. - Vol. 8, №2. - P. 99–106.
- 50 Lu Z., Du J., Sun Y., Su G., Zhang C., Kong X. Effect of ultrafine WC contents on the microstructures, mechanical properties and wear resistances of regenerated coarse grained WC–10Co cemented carbides // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2021. - Vol. 97. – 105516 p .
- 51 Yin C., Peng Y., Ruan J., Zhao L., Zhang R., Du Y. Influence of Cr_3C_2 and VC content on WC grain size, WC shape and mechanical properties of WC–6.0Co wt.% Co cemenred carbides // *Materials*. - 2021. - Vol. 14. - 1551 p.
- 52 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 Materialia*. - 2003. - Vol. 48, №5. - P. 635–639.
- 53 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 // *Ceramics International*. - 2020. - Vol. 46, №2. - P. 1824–1829.

- 54 Gu L., Huang J., Xie C. Effects of carbon content on microstructure and properties of WC–20Co cemented carbides // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2014. - Vol. 42. - P. 228–232.
- 55 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 // *Ceramics International*. - 2018. - Vol. 44, №15. - P. 18711–18718.
- 56 Wang H., Webb T., Bitler J.W. Study of thermal expansion and thermal conductivity of cemented WC–Co composite // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2015. - Vol. 49. - P. 170–177.
- 57 Fang Z.Z. Correlation of transverse rupture strength of WC–Co with hardness // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2005. - Vol. 23, №2. - P. 119–127.
- 58 Todd R.I., Derby B. Thermal stress induced microcracking in alumina–20% SiC_p composites. *Acta Materialia*. 2004. - Vol. 52, №6. - P. 1621–1629.
- 59 Nohut S. Prediction of crack-tip toughness of alumina for given residual stresses with parallel-bonded-particle model // *Computational Materials Science*. - 2011. - Vol. 50, №4. - P. 1509–1519.
- 60 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 // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2020. - Vol. 92. art. 105337.
- 61 Sirota V.V., Gevorkyan É.S., Kovaleva M.G., Ivanisenko V.V. Structure and properties of nanoporous ceramic Al₂O₃ obtained by isostatic pressing. *Glass and Ceram. (English translation of Steklo i Keramika)*. - 2013. - Vol. 69, №9–10. P. 342–345.
- 62 García J., Ciprés V.C., Blomqvist A., Kaplan B. Cemented carbide microstructures: A review // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. -2019. - Vol. 80. - P. 40–68.
- 63 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 // *Materials Science and Engineering. A*. - 2008. - Vol. 473. - P. 323–329.
- 64 Kolodnits'kyi V.M., Bagirov O.E. (2017). On the structure formation of diamond-containing composites used in drilling and stone-working tools (A review). // *Journal of Superhard Materials*. - 2017. - Vol. 39, №1. - P. 1–17.
- 65 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., Moshchisl V.T., Borash A.R., Muzaparova A.B.. A study of the structure and strength properties of the WC–Co drill insert with different CrB₂ content sintered by vacuum hot pressing. // *SOCAR Proceedings*. -2022. - №1. - P. 37–46.
- 66 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., Borash A. R. Structure and properties of WC–Co composites with different CrB₂ concentrations, sintered by vacuum hot pressing, for drill bits // *Journal of Superhard Materials*. - 2021. - Vol. 43, №5. - P. 344–354.

67 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–CrB₂ composites sintered by vacuum hot pressing for drill tools. *Journal of Superhard Materials*. - 2022. - Vol. 44, №1. - P. 1–11.

68 Ratov B.T., Mechnik V.A., Kolodnitsky V.M., Kuttybayev A., Muzapparova A. Drilling inserts of the WC–Co–CrB₂ system with increased mechanical properties. In *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2021. - Vol. 21, №1. - P. 617–626.

69 Novikov M.V., Mechnyk 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 // *Journal of Superhard Materials*. 2015. - Vol. 37, №6. - P. 402–416.

70 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 CrB₂ used as matrices for diamond-containing composites // *Journal of Superhard Materials*. 2020. - Vol. 42, №4. - P. 251–263.

71 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 CrB₂ on the microstructure, properties, and wear resistance of sintered composite and the diamond retention in Fe–Cu–Ni–Sn matrix // *Journal of Superhard Materials*. - 2021. - Vol. 43, №3. - P. 175–190.

72 Mechnik V.A., Bondarenko M.O., Kolodnitskyi V.M., Kuzin M., 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 CrB₂ content. *International // Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. - 2021. - Vol. 100. – 105655 p.

73 Ratov B, Kuttybayev A, Tileuberdi N, Utepov Z, Aliakbar M, Zhanggir-khanova A, Pashchenko O, Kamyshatskyi O, Khomenko V, Zaichuk O & Seidaliev A. (2025). Application of Plasticizers Octadecane to Pentatriacontane and Ethylene Glycol in the Manufacture of Metaloceramic Alloys // *Engineered Science Publisher. ES Energy & Environment*, 2025. - №27. – 1417 p. <http://dx.doi.org/10.30919/mm1563>

74 Pat. 6617271 B1 USA, IC C04B 35/56. Tungsten carbide cutting tool materials. V. Y. Kodash, E. S. Gevorkian. Publ. 09.09.2003.

75 ISO 25178: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.

76 Oliver W. C., Pharr G. M., An improved for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *J. Mater. Res*. 1992. - № 7 (6). – P. 1564–1583.

77 Bl'anda M., Duszová A., Csanádi T., Hvizdoš P., Lofaj F., Dusza // J. Indentation fatigue of WC grains in WC–Co composite // J. Eur. Ceram. Soc. – 2014. - №34. – P.3407–3412.

78 Smirnov O., Dzhagan V., Kovalenko M., Gudymenko O., Dzhagan V., Mazur N., Isaieva O., Maksimenko Z., Kondratenko S., Skoryk M., Yukhymchuk V.: ZnO and Ag NP-decorated Zn Onanoflowers: greensynthesis using Ganoderma lucidum aqueousextract and characterization // Royal Society of Chemistry 2023. - №13. – P.756–763.

79 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. *Mechanical Sciences*, 2022. - №13 (2). – P.867–875.

80 Сердюк Н.И., Куликов В.В. Бурение скважин различного назначения. – М.: 2007. – 611с.

81 Khomenko V, Muratova S, Uteпов Z, Zhanggirkhanova A. Improved technique for measuring rheological properties of drilling fluid // Engineering for rural development, ERDev 2025. – P. 497-504. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025>. 24.TF 107.

82 Ганджумян Р.А., Калинин А.. - Сердюк Н.И. Расчеты в бурении. – М.: 2007. – 664 с.

83 Танатаров Т.Т., Билецкий М.Т. Основы научных исследований и оптимизации в бурении. – Алматы: РИК, 1998. – 205 с.

84 Башкатов Д.Н. Планирование эксперимента в разведочном бурении. – М: Недра, 1985. – 179 с.

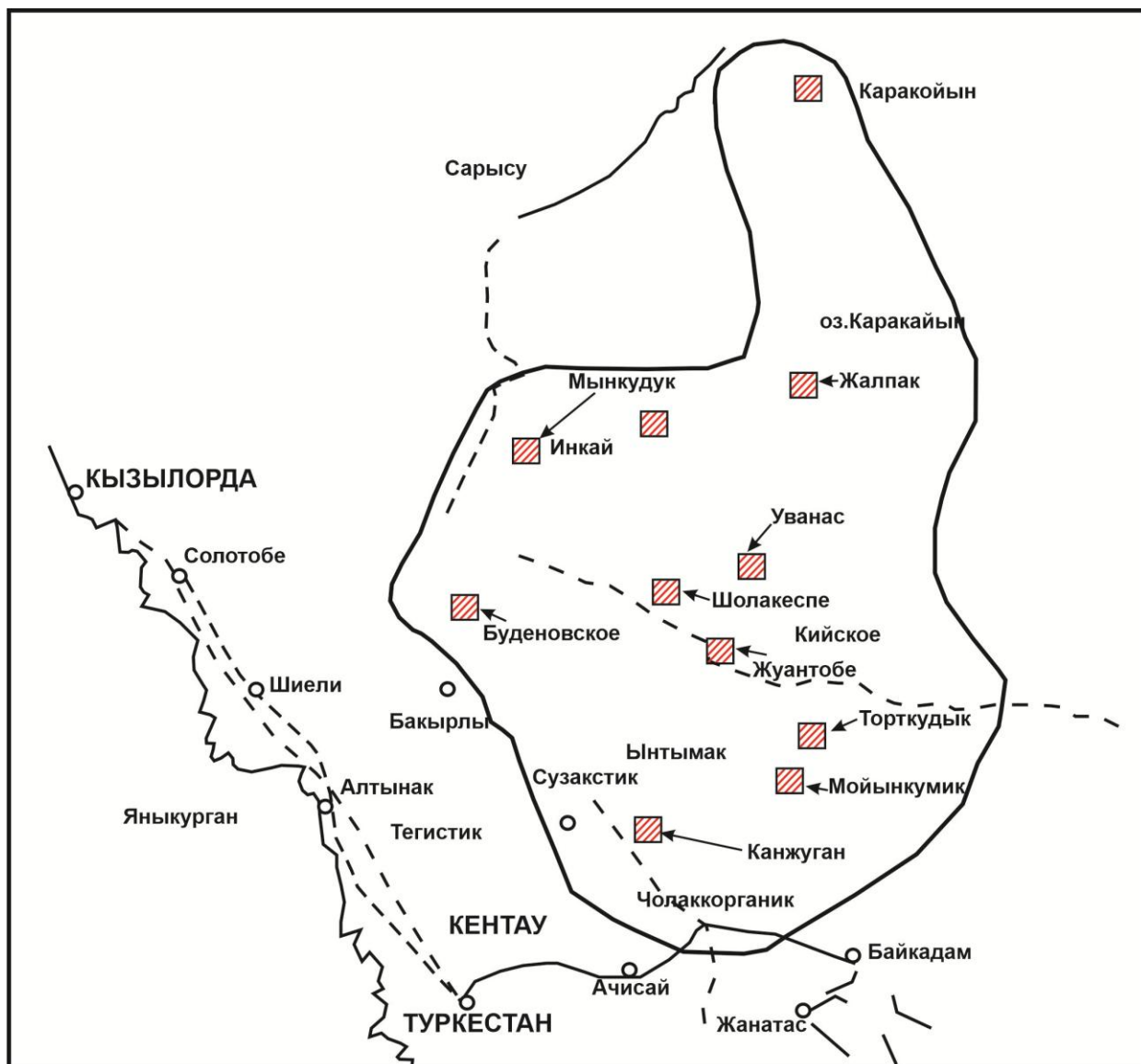
85 Патент РК № 37967. Способ изготовления гравийного фильтра блочного типа / Ратов Б.Т., Куттыбаев А.Е., Утепов З.. - Судаков А.К., Судакова Д.А., Сарбопеева М.Д. – Заявка № 2025/0077.1 от 31.01.2025 , опубликовано 10.04.2026, Бюл. № 14.

86 Ratov B.T., Khomenko V.L., Kuttybayev A.E., Togizov K.S., Uteпов Z.G. (2024). Innovative drill bit to improve the efficiency of drilling operations at uranium deposits in Kazakhstan // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences. - 2024. – Vol. 4., № 466 (2024). – P. 224–236. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.43>.

87 Кожамет К.А., Утепов З.Г. - 2026. Совершенствование бурового долота для геотехнологических скважин // Международный научный журнал «Вестник науки». – 2026. - № 5 (98). - Т. 4.

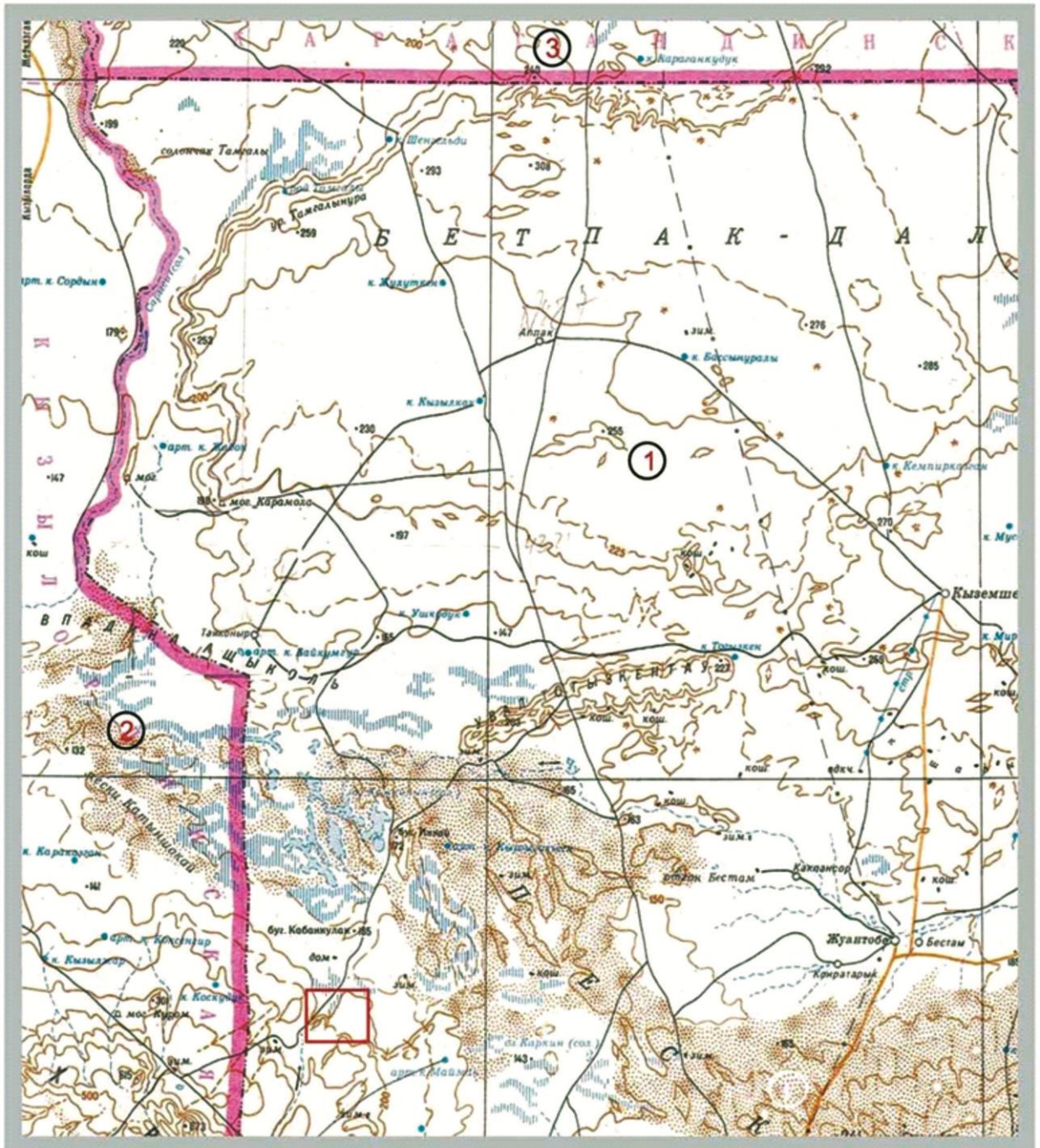
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Карта Шу-Сарысуской ураново-рудной провинции



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Административная карта расположения месторождения Буденовское



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент на полезную модель «Буровое долото типа пикобур»

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ӘДІЛЕТ МИНИСТРЛІГІ ЗИЯТКЕРЛІК
МЕНШІК ҚҰҚЫҒЫ КОМИТЕТІНІҢ
«ҰЛТТЫҚ ЗИЯТКЕРЛІК МЕНШІК
ИНСТИТУТЫ»
ШАРУАШЫЛЫҚ ЖҮРГІЗУ
ҚҰҚЫҒЫНДАҒЫ РЕСПУБЛИКАЛЫҚ
МЕМЛЕКЕТТІК КӘСІПОРНЫ



РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ НА ПРАВЕ
ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ»
КОМИТЕТА ПО ПРАВАМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

010000, Астана қаласы, «Есіл» ауданы,
Мәңгілік Ел даңғылы, 57 А ғимарат, 8-т.е.у.
Тел: (7172) 62 15 15_
<https://qazpatent.kz/ru>, e-mail: qazpatent@qazpatent.kz,

010000, г. Астана, район «Есіл»
проспект Маңғылқ Ел, здание 57 А, и.п.8.
Тел: (7172) 62 15 15_
<https://qazpatent.kz/ru>, e-mail: qazpatent@qazpatent.kz,

Кульдеев Ержан Итеменович

*микрорайон Аксай 4, дом 32, квартира 3,
город Алматы, 050000,
n.nazarbayeva@satbayev.university*

РЕШЕНИЕ

о выдаче патента на полезную модель

Регистрационный номер заявки 2026/0801.2

Дата подачи заявки 30.01.2025

В результате экспертизы заявки на полезную(ые) модель(и) в соответствии с пунктом 2 статьи 23 Патентного закона Республики Казахстан принято решение о выдаче патента на полезную модель.

Приложение: Заключение экспертизы на 1 л. в 1 экз

**Подписано ЭЦП:
А. Артыкова (Заместитель директора)**

(74)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
о выдаче патента на полезную модель

(21) Заявка № 2026/0801.2

(22) Дата подачи заявки 30.01.2025

ПРИОРИТЕТ УСТАНОВЛЕН:

- (22) по дате подачи заявки
 (23) по дате поступления дополнительных материалов от _____ к более ранней заявке № _____
 (66) по дате подачи ранее поданной заявки № _____ от _____
 (62) по дате подачи первоначальной заявки № _____ от _____
 по дате подачи первой заявки в государстве-участнике Парижской конвенции

(31) № приоритетной заявки (32) Дата подачи приоритетной заявки (33) Код страны приоритетной заявки

(85) Дата перевода международной заявки на национальную фазу

(86) Регистрационные данные заявки РСТ

(71) Заявитель(и) «К.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (KZ)

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (KZ)

(72) Автор (ы)

Билецкий Мариан Теодорович (KZ)

Рагов Боранбай Товбасарович (KZ)

Утепов Заманбек Габитович (KZ)

Сейдалиев Аскар Абиевич (KZ)

(51) МПК

E21B 10/12 (2006.01)

(54) Название полезной модели

БУРОВОЕ ДОЛОТО ТИПА ПИКОБУР
НАЙЗА ТӘРІЗДІ БҰРҒЫЛАУ ҚАШАУЫ

(56)

KZ 33077 В 10.09.2018

На основании пункта 1 статьи 23 Патентного закона Республики Казахстан проверка соответствия заявленной полезной модели условиям патентоспособности, установленным пунктом 1 статьи 7 Патентного закона Республики Казахстан, не проводилась. Патент выдается на риск и под ответственность заявителя.

В результате экспертизы, проведенной в соответствии с пунктом 2 статьи 23 Патентного закона Республики Казахстан, установлено, что заявка относится к объектам, охраняемым в качестве полезных моделей и документы соответствуют установленным требованиям и выдается заключение о выдаче патента на полезную модель.

Подписано ЭЦП:

А. Батырбекова (Руководитель департамента)

Ж. Омарова (Руководитель управления)

Ш. Алимбеков (Г лавный эксперт)

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Способ изготовления гравийного фильтра блочного типа
№37967

КАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  **РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН**

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 37967

ӨНЕРТАБЫСҚА / НА ИЗОБРЕТЕНИЕ / FOR INVENTION

 (21) 2025/0077.1

(22) 31.01.2025

(45) 10.04.2026

(54) БЛОКТЫҚ ТИПТЕГІ ҚИЫРШЫҚ ТАС СҮЗГІСІН ЖАСАУ ТӘСІЛІ
СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГРАВИЙНОГО ФИЛЬТРА БЛОЧНОГО ТИПА
METHOD FOR MANUFACTURING A BLOCK-TYPE GRAVEL FILTER.

(73) «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (KZ)
Некоммерческое акционерное общество «Казакский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сәтбаева» (KZ)
«K.I. Satbayev Kazakh National Technical Research University» Non-profit joint stock company (KZ)

(72) Ратов Боранбай Товбасарович (KZ) Ratov Boranbay Tovbasarovich (KZ)
Куттыбаев Айдар Ермекалиевич (KZ) Kuttybayev Aidar Yermekaliyevich (KZ)
Утепов Заманбек Габитович (KZ) Uteпов Zamanbek Gabitovich (KZ)
Судаков Андрей Константинович (UA) Sudakov Andrey Konstantinovich (UA)
Судакова Диана Андреевна (UA) Sudakova Diana Andreevna (UA)
Сарбопеева Маншук Дагистановна (KZ) Sarbopeeva Manshuk Dagistanovna (KZ)



ЭЦК қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

С. Ахметов
С. Ахметов
S. Akhmetov

«Ұлттық аяқкерлік меншік институты» РМҚС директоры
Директор РПТ «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

Патентті күшінде ұстау аяқсы уақытылы төленген жағдайда патенттің күші
Қазақстан Республикасының бүкіл аумағында қолданылмайды.

Патентке енетарбыстың толық сипаттамасы www.kazpatent.kz ресми сайтында
«Қазақстан Республикасының енетарбыстарының мемлекеттік тізілімі» бөлімінде қолжетімді.

Действие патента распространяется на всю территорию Республики Казахстан
при условии своевременной оплаты поддержания патента в силе.

Полное описание изобретения к патенту доступно на официальном сайте www.kazpatent.kz
в разделе «Государственный реестр изобретений Республики Казахстан».

Subject to timely payment for the maintenance of the patent in force
the patent shall be effective on the entire territory of the Republic of Kazakhstan.

Full description of the patent for invention are available on the official website www.kazpatent.kz
in the section «State Register of Inventions of the Republic of Kazakhstan».



Қазақстан Республикасы Әділет министрлігінің
«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ
Астана қаласы, Мәңгілік Ел даңғылы, ғимарат 57А

РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Министерства юстиции Республики Казахстан
Город Астана, проспект Мәңгілік Ел, здание 57А

«National Institute of Intellectual Property» RSE,
Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan
Astana, 57A Mangilik El Avenue

Тел./Tel: +7 (7172) 62-15-15
E-mail: kazpatent@kazpatent.kz
Website: www.kazpatent.kz

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт производственных испытаний пикобура ПК – РУБ для бурения геотехнологических скважин (Буровое долото типа пикобур)



Акт производственных испытаний пикобура ПК-РУБ для бурения геотехнологических скважин

Мы, нижеподписавшиеся: Утепов Заманбек Габитович — докторант НАО «Каспийского государственного университета технологий и инженерии имени Ш. Есенова», Тулепбергенов А.Т. – главный менеджер ПТО ТОО «СП «РБМ-Казахстан», Тлеуберген А.Ж. — главный технолог ТОО «СП «РБМ-Казахстан», Карибаев Е.Д. — начальник участка буровых работ, Ахметкалиев М.Ж. – ведущий технолог участка буровых работ составили настоящий акт о следующем:

В процессе бурения закачной геотехнологической скважины №84-136НР на участке №2 месторождения «Буденовское» были проведены производственные испытания пикобура ПК-РУБ, разработанного нами. Особенностью конструкции является формирование на забое опережающего кольцевого вруба малого диаметра с последующим его расширением до номинального диаметра скважины (161 мм).

Испытания проводились с целью оценки эффективности применения нового породоразрушающего инструмента, изготовленного из композиционных алмазосодержащих материалов Салмаз-(WC-Co) с добавками CrV₂, полученных методом плазменно-искрового спекания. Разработка направлена на повышение производительности бурения и снижение эксплуатационных затрат при проходке скважин в прочных и абразивных горных породах.

Техническая характеристика ПК-РУБ:

- Диаметр бурения: 161 мм
- Наружный диаметр опережающего кольцевого вруба: 50 мм
- Количество ступенчатых лопастей: 4
- Конструкция жесткости: стальное кольцо, приваренное к нижним ступеням лопастей

- Промывка: центральная, через трубчатый корпус
- Наружный диаметр кольца жесткости: 40 мм
- Количество ступеней на каждой лопасти: 9
- Вооружение лопастей: твердосплавные резцы
- Высота инструмента: 240 мм
- Масса: 3,5 кг

Состав бурового снаряда:

- УБТ Ø89 мм — 7 м
- УБТ Ø73 мм — 7 м
- УБТ Ø63 мм — 7 м
- Ребристая БТ Ø50 мм — 10 м
- Бурильные трубы СБТМ 50
- Применяемая буровая установка: ПБУ-1200MP
- Проектная глубина скважины: 650 м

Геологический разрез буримых пород и интервалы их залегания:

- 0–120 м — пески мелкозернистые с прослоями карбонитизированных глин
- 120–210 м — пески карбонитизированные с прослоями карбонитизированных глин

- 210–320 м — глины карбонитизированные с прослоями песка
- 320–400 м — пески мелкозернистые, глины плотные
- 400–480 м — глины плотные, горизонтально сложенные

Параметры бурения:

- Осевая нагрузка: 5 кН
- Частота вращения пикобура: 136–288 об/мин
- Расход бурового раствора: до 200 л/мин
- Плотность раствора: 1,22–1,25 г/см³
- Вязкость: 22–24 сек
- Водоотдача: 15–20 см³ за 30 мин
- Содержание песка: менее 4%

Результаты испытаний:

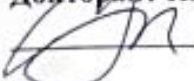
- Механическая скорость бурения изменялась от 16–18 м/ч (в верхних интервалах) до 3 м/ч (на глубине 400–436 м в плотных глинах)
- Общая глубина бурения составила 436 м
- В процессе бурения на глубине 436 м зафиксировано прекращение углубки вследствие изгиба лопастей инструмента
- Наружный осмотр показал деформации твердосплавных резцов, формирующих кольцевой вруб
- Предполагаемая причина: размещение кольца жесткости на расстоянии 20 мм от забоя, что привело к недостаточной жесткости конструкции

Выводы и рекомендации:


1. Пикобур ПК-РУБ продемонстрировал высокую производительность и повышенную стойкость — пройдено 436 м (при сравнении с известными пикобурами, достигающими 350 м).
2. Рекомендуется к применению при бурении верхних интервалов скважин до 450 м.
3. Для повышения надежности — разместить кольцо жесткости с керноломом на расстоянии 10 мм от забоя.
4. В дальнейшем — разработать комбинированный буровой инструмент со смешанным твердосплавным вооружением (в том числе PDC), способный обеспечивать проходку до 650 м за один рейс без извлечения инструмента.


Подписи:


Докторант НАО КГУТИ им. Ш. Есенова:


 /Утепов З.Г./

Сотрудники ТОО «СП «РБМ-Казахстан»:

 /Тулпбергенов А.Т./

 /Тлеуберген А.Ж./

 /Карибаев Е.Д./

 /Ахметкалиев М.Ж./