

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Колибасов Владимир Александрович

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПОВЕРХНОСТНОГО
РАЗРУШЕНИЯ АЛМАЗНЫХ РЕЗЦОВ БУРОВЫХ ДОЛОТ И
СРЕДСТВА ДЛЯ ИХ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент

Новиков Владислав
Александрович

Самара–2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	14
1.1 Общие сведения о PDC долотах и условиях их эксплуатации на забое.....	14
1.2 Основные виды повреждений PDC-резцов при эксплуатации.....	20
1.3 Проблемы управления качеством PDC-резцов.....	26
1.4 Выводы по 1-й главе.....	40
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ PDC-РЕЗЦОВ И ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ИХ РЕЖУЩИХ КРОМОК НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ДОЛОТА.....	46
2.1 Фрактографический анализ разрушенной поверхности PDC-резцов.....	49
2.2 Исследование структуры PDC слоя большого резца.....	50
2.3 Исследование структуры PDC слоя малого резца.....	51
2.4 Исследование структуры PDC-резцов с гладким разрушением и хрупким выкрашиванием рабочей кромки.....	53
2.5 Анализ полученных результатов.....	56
2.6 Выводы по 2-й главе.....	63
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОТКАЗА PDC ДОЛОТ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ.....	65
3.1 Разработка специализированного оборудования и методов оценки твердости материалов вдавливанием и царапанием поликристаллической алмазной пластиной.....	65
3.2 Разработка критерия отказа PDC долот при эксплуатационном разрушении резцов.....	74
3.3 Выводы по 3-й главе.....	79
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДИКИ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ PDC-РЕЗЦОВ.....	80

4.1	Разработка схемы и специализированного оборудования для оценки стойкости PDC-резцов к поверхностному разрушению при трении о закрепленный абразив.....	80
4.2	Апробация пилотной методики и специализированного оборудования для оценки стойкости PDC-резцов к поверхностному разрушению при трении о закрепленный абразив.....	85
4.3	Разработка усовершенствованного специализированного оборудования и методики лабораторных испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению.....	91
4.4	Апробация усовершенствованной методики и средств испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению.....	97
4.5	Исследование качества PDC-резцов по критерию стойкости к поверхностному разрушению.....	98
4.6	Фрактографические исследования разрушенной поверхности PDC-резцов при лабораторных испытаниях.....	101
4.7	Выводы по 4-й главе.....	103
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ СТОЙКОСТИ PDC-РЕЗЦОВ К ПОВЕРХНОСТНОМУ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ.....		105
5.1	Ранжировочные испытания для оценки критериев классификации PDC-резцов, распределенных по эксплуатационным группам в соответствии со стойкостью к поверхностному разрушению.....	105
5.2	Металлографические исследования PDC-резцов.....	105
5.3	Исследование влияние циклических температурных воздействий на стойкость PDC-резцов к поверхностному разрушению.....	109
5.4	Исследование качества PDC-резцов по критерию стойкости к поверхностному разрушению.....	111
5.5	Исследование влияния размеров зерен к поверхностному разрушению PDC-резцов.....	115

5.6 Анализ влияния элементного состава PDC-пластин на стойкость к поверхностному разрушению.....	117
5.7 Обоснование возможности применения разработанной методики для сертификационных испытаний PDC-резцов.....	120
5.8 Выводы по 5-й главе.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	127
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

В настоящее время около 70% мирового объема строительства скважин на нефть и газ приходится на буровые долота, вооруженные алмазными резами. При рассмотрении алмазных резцов буровых долот распространено применение аббревиатуры PDC - Polycrystalline Diamond Cutters (поликристаллические алмазные резцы), поэтому в настоящей работе используется обозначение PDC-резцы буровых долот.

По сравнению с шарошечными, алмазные долота при бурении мягких малоабразивных пород позволяют добиться более высокой проходки на долото (в 2...5 раз) и механической скорости (в 2 раза) за счет того, что процесс срезания поверхностного слоя породы алмазной режущей кромкой является более эффективным, чем ее дробление вдавливанием твердосплавных зубков, а твердость и износостойкость поликристаллической алмазной пластины на порядок выше, чем у твердого сплава. Данные преимущества достигаются только при оснащении долота качественными PDC-резцами. Это качество может меняться от партии к партии даже при наличии сертификатов, надежных поставщиков и известных брендов, что требует разработки методов и специализированного оборудования для испытаний стойкости PDC-резцов к эксплуатационным воздействиям, которые позволят с единых позиций исследовать, сравнивать и ранжировать резцы по группам. Это можно сделать на основе понимания материаловедческих вопросов, касающихся физических механизмов и закономерностей разрушения поликристаллических алмазных пластин при трении о забой, критериев работоспособности PDC-резцов с учетом свойств породы, влияния состава и структуры поликристаллических алмазов на скорость разрушения режущих кромок. Поскольку с 2023 года в России впервые запущено производство отечественных PDC-резцов (ООО «Алком»), вопрос подтверждения соответствия продукции установленным требованиям, т.е. сертификации PDC-резцов является важным и своевременным.

Диссертационная работа содержит ряд научно обоснованных результатами

материаловедческих исследований технических решений для совершенствования системы управления качеством в области технологии производства алмазных долот за счет создания методов и средств сертификационных испытаний породоразрушающих резцов с поликристаллическими алмазными пластинами. Приведены результаты изучения физических механизмов разрушения PDC-резцов на основе фрактографического анализа поврежденных поверхностей. Предложен критерий оценки работоспособности алмазных долот с учетом величины поверхностного разрушения резцов с использованием нового метода оценки твердости посредством царапания породы поликристаллической алмазной пластиной. Разработаны новый стенд и методика для входного контроля PDC-резцов, позволяющие ранжировать изделия по стойкости к поверхностному разрушению с использованием металлического металл-алмазного «забоя». Полученные результаты позволяют проводить сертификационные испытания PDC-резцов и относить их к одной из четырех групп эксплуатационных свойств по стойкости к поверхностному разрушению.

Степень разработанности.

В настоящее время наиболее распространенным является испытание PDC-резцов на стойкость к изнашиванию путем резания кромкой поликристаллической алмазной пластины гранитного образца с использованием станков карусельного типа. Этот метод входного контроля качества резцов, разработанный зарубежными производителями данных изделий стал использоваться и российскими долотостроительными компаниями. К началу работы над диссертацией имелись научные труды, описывающие новые подходы к контролю качества PDC-резцов, в которых поверхностное разрушение поликристаллических алмазных пластин выполнялось при трении о шлифовальный круг с абразивными зёрнами карбида кремния. Появился первый патент, описывающий неразрушающий акустико-эмиссионный метод контроля резцов. В процессе работы над диссертацией стали появляться первые отечественные руководящие документы, подводящие методическую базу под единую систему контроля

качества резцов, в которых отмечаются два ведущих механизма разрушения резцов: абразивное изнашивание и хрупкие сколы, стойкость к которым подлежит оценке перед сборкой долот. Однако до сих пор нет научно-обоснованной идентификации физических процессов разрушения алмазных поликристаллических пластин в процессе их поверхностного разрушения, а также единых методов и технических средств оценки качества, и критериев ранжирования резцов по стойкости к поверхностному разрушению.

Цель работы заключается в установлении закономерностей влияния состава и структуры поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов на механизм и интенсивность их поверхностного разрушения при эксплуатационных механических воздействиях, а также в разработке материаловедческих критериев, методов контроля и средств сертификационных испытаний для повышения достоверности оценки качества PDC-резцов буровых долот.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Установить физико-механические закономерности поверхностного разрушения поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов буровых долот при эксплуатации.
2. Установить влияние химического состава, содержания металлической связки и размера алмазных зерен поликристаллических алмазных пластин на стойкость к поверхностному разрушению.
3. Разработать материаловедческий критерий предельного состояния PDC-резцов, связывающий твердость разбуриваемой породы, степень поверхностного разрушения поликристаллической алмазной пластины и работоспособность режущей кромки.
4. Разработать методику и специализированное оборудование для сертификационных испытаний поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов по критерию стойкости к поверхностному разрушению.
5. Разработать классификацию PDC-резцов по стойкости поликристаллических алмазных пластин к поверхностному разрушению для

применения при сертификационных, сравнительных и приемочных испытаниях.

Научная новизна работы.

В работе получены следующие научные результаты:

1. Установлены механизм и закономерности поверхностного разрушения поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов при эксплуатации. Показано, что поверхностное разрушение реализуется за счет контактной усталости, связанной с накоплением повреждений в виде образования, развития и слияния трещин в алмазных зернах под действием циклических нагрузок. Выделены шесть характерных субструктур, формирующихся в процессе фрагментации зерен: полосчатая, каменистая, ямочная, канавочная, ступенчатая и серповидная.

2. Установлено влияние структуры и химического состава поликристаллических алмазных пластин на их стойкость к поверхностному разрушению. Показано, что с увеличением среднего размера алмазных зерен в диапазоне от 19 до 40 мкм наблюдается монотонный рост стойкости пластин. Содержание вольфрама до 1,55% масс. оказывает незначительное влияние на стойкость пластин к поверхностному разрушению. Минимальное поверхностное разрушение PDC-пластин наблюдается на резцах с содержанием кобальта в пределах от 2 до 3% масс.

3. Разработан материаловедческий критерий оценки предельного состояния PDC-резцов, связывающий твердость разбуриваемой породы, площадь изношенной поверхности режущей кромки и степень поверхностного разрушения поликристаллической алмазной пластины. На основе критерия научно обоснован выбор металл-алмазного контртела для воспроизводимых сертификационных испытаний стойкости PDC-пластин к поверхностному разрушению.

Практическая значимость

1. Разработана методика входного контроля качества PDC-резцов, позволяющая ранжировать их по группам стойкости перед использованием при

сборке долот. Разработана методика входного контроля качества PDC-резцов, позволяющая ранжировать их по группам стойкости перед использованием при сборке долот.

2. Предложены критерии оценки работоспособности резцов и алмазных долот, позволяющие учитывать свойства разбуриваемой породы и степень разрушения режущих кромок.

3. Разработаны методика, специализированное оборудование и критерии ранжирования PDC-резцов для сертификационных испытаний по стойкости к поверхностному разрушению. Критерии ранжирования включают 4 группы в зависимости от скорости разрушения алмазной пластины.

4. Разработанная методика оценки стойкости PDC-резцов к поверхностному разрушению при трении о закреплённый абразив, разработанное специализированное испытательное оборудование для их испытаний, а также предложенная классификация PDC-резцов по группам стойкости к поверхностному разрушению, были использованы в ООО «ХимБурСервис» и ООО «РН-Сервис». Данные разработки также могут быть внедрены предприятиями-изготовителями и потребителями PDC-резцов для проведения сертификационных, сравнительных и приёмочных испытаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № 125040404855-0). Также исследования отмечены победой в грантовом конкурсе «Студенческий стартап» и получением гранта I степени от ООО «СамараНИПИнефть», которые подтверждены дипломами в приложениях А и Б.

Соответствие паспорту научной специальности.

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) по следующим пунктам:

- п. 1. Разработка новых металлических и композиционных материалов, в том числе капиллярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности,

состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и иных факторов на функциональные свойства материалов. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций (химической, нефтехимической, энергетической, машиностроительной, легкой, текстильной, строительной).

- п. 5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических, и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды.

- п. 6. Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий.

- п. 7. Теоретические и прикладные проблемы стандартизации новых материалов и технологических процессов их производства, обработки и переработки. Системы управления качеством, сертификация и аккредитация материалов и технологических процессов.

Методология и методы исследования: Фрактографический и химический (элементный) анализы проводили на растровом электронном микроскопе Jeol JSM – 6390A. Эксперименты с термоциклированием резцов перед испытаниями на поверхностное разрушение проводили в муфельной печи. Испытания на поверхностное разрушение проводили на собственном разработанном специализированном оборудовании по новой методике. ДюрOMETрический анализ твердых пород проводили по новому способу на разработанном твердомере. Сличительные испытания проводили на резцах с известной наработкой, используя неповрежденные участки поликристаллической алмазной пластины этих резцов.

Объект исследования: поликристаллические алмазные пластины в

составе породоразрушающих PDC-резцов для алмазных буровых долот.

Предмет исследования: физические механизмы повреждаемости и разрушения поликристаллических алмазных пластин; стойкость к поверхностному разрушению и их признаки.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности поверхностного разрушения поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов, проявляющиеся в формировании характерных субструктур разрушения и реализации механизма контактной усталости.

2. Установленные зависимости стойкости PDC-пластин к поверхностному разрушению от размеров алмазных зерен и содержания металлической связки.

3. Критерий оценки работоспособности алмазных долот, учитывающий твердость разбуриваемой породы и степень поверхностного разрушения рабочих кромок PDC-резцов.

4. Методика, специализированное оборудование и критерии классификации PDC-резцов для сертификационных испытаний, позволяющие их ранжировать по группам стойкости к поверхностному разрушению.

Степень достоверности.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается: значительным объёмом экспериментальных данных (исследовано более 30 партий резцов по химическому составу), а также проведены ранжировочные испытания по 5 резцов из каждой партии, что обеспечивает статистическую значимость выборки; применением современного, в том числе сертифицированного, аналитического и испытательного оборудования, включая систему сбора данных, сканирующий электронный микроскоп (SEM) и микрорентгеноспектральный анализ, что гарантирует высокую точность и объективность получаемых данных; использованием статистических методов обработки и анализа экспериментальных результатов; отсутствием противоречий полученных данных с фундаментальными теоретическими

положениями и результатами исследований, опубликованными ведущими отечественными и зарубежными учёными в данной области. Абсолютную погрешность измерений при экспериментах рассчитывались по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях и семинарах: XXXV Международная научно-практическая конференция «Междисциплинарные исследования: опыт прошлого, возможности настоящего, стратегии будущего» (Мельбурн, 2023 г.), XXI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2024 г.) Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (Москва, 2024 г.), семинар «Актуальные проблемы надежности машин и оборудования» (Самара, 2024 г.), XXII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2024 г.), Научно-технический семинар «Актуальные проблемы надежности машин и оборудования» (Самара, 2024 г.), Международная научно-практическая конференция "Материаловедение, металлургия цветных, редких и благородных металлов: последние тенденции, современные методы, новые технологии" (Минск, 2025г.), Всероссийская научно-практическая конференция «Ашировские чтения» (Самара, 2025 г.), VIII Международная научно-практическая конференция «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (Санкт-Петербург, 2026 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач, разработке методологии исследования, проведении экспериментов, обработке и интерпретации результатов, а также формулировке всех основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы, подготовке научных публикаций и представлении результатов работы на конференциях. Основные экспериментальные результаты получены при

непосредственном участии автора.

Публикации: по результатам выполненных исследований опубликовано 12 работ, в том числе 3 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых изданий, 1 в издании, входящих в международную базу данных Scopus, 2 патента РФ на изобретения: способ и устройство для испытаний PDC-резцов (№ 2821174, № 2821172 от 26.03.2024 г.).

ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1.1 Общие сведения о PDC долотах и условиях их эксплуатации на забое

В современном нефтегазовом оборудовании особое место занимают высокотехнологичные буровые инструменты, из которых наиболее эффективными являются алмазные и матричные буровые долота (или PDC долота) [1, 2]. Ключевой особенностью конструкции этих долот является использование для разрушения породы специальных резцов, армированных поликристаллическими алмазными пластинами (в ряде работ их называют алмазно-твердосплавными пластинами [3-17], закрепленными на прочном твердосплавном основании. Другие особенности алмазных долот перед шарошечными аналогами приведены в таблице 1.1.

Типовая конструкция PDC долота приведена на рисунке 1.1. Она включает всего четыре основных элемента: корпус (монолитная деталь, объединяющая все остальные части и определяющая габариты долота); режущие элементы (PDC резцы, впаиваемые в корпус и определяющие эффективность долота); гидромониторные насадки для создания струй бурового раствора, очищающих забой от частиц породы (шлама) и охлаждающих резцы; хвостовик с присоединительной резьбой, передающий на долото энергию и связывающей его с буровой колонной.

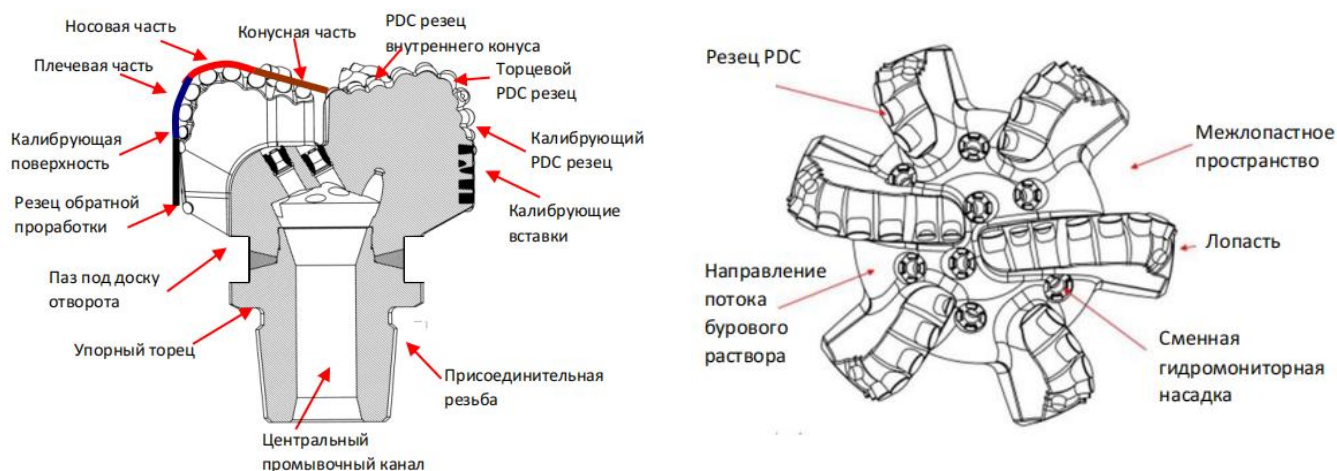


Рисунок 1.1 – Конструкция PDC долота

Таблица 1.1 – Характеристика алмазных долот по сравнению с шарошечными

Преимущества	Недостатки
Скалывание породы PDC-резцами позволяет удалять больший объем материала за один оборот, чем дробление твердосплавными зубками.	Агрессивность алмазного долота приводит к большей нагрузке на стенки скважины. Трещины при скалывании породы распространяются в стенки скважины и повышается вероятность их повреждения.
Отсутствие подвижных частей, которые могут отламываться при работе на забое.	Возможно выпадение резцов, содержащих сверхтвердые алмазные пластины при работе долота на забое за счет эрозии припоя, некачественной пайки или некорректного расположения резца в корпусе долота.
Возможно бурение при меньших осевых нагрузках и более высоких скоростях вращения.	Крутящий момент при скалывании породы более высокий и менее стабильный, чем при обкатывании забоя шарошками. Повышенные требования к используемым двигателям.
Алмазное долото является ремонтпригодным и отличается ремонтной и производственной технологичностью.	В России почти отсутствует собственное производство (1 компания, занимающаяся производством) породоразрушающих PDC-резцов и стандартизированные методы их сертификационных испытаний. В России нет ресурса для научных исследований и разработок в области совершенствования технологии, материала и формы резцов. Кроме того, санкции и ограничения создают макроэкономические риски отечественного производства алмазных долот. Есть риски поставки некачественных партий резцов в Россию.
Снижение себестоимости строительства скважин.	Высокая стоимость алмазного долота
Алмазные долота осуществляют максимальные проходки за рейс.	Алмазными долотами не рекомендуется бурить твердые, абразивные породы, глинистый грунт и др.
PDC резцы имеют на порядок более высокую стойкость к изнашиванию.	Алмазы менее устойчивы к динамическим нагрузкам (ударам и вибрациям), которые сами и инициируют при взаимодействии с породой и буровой колонной особенно при возникновении резонанса. При этом повреждается не только долото, но все элементы буровой колонны.
Нет внутренних изнашивающихся частей. Отсутствует необходимость использования смазок и герметизирующих уплотнений.	Более жесткая передача на элементы КНБК всех сил реакции забоя требует введения амортизирующих и демпфирующих устройств.
Алмазные долота показывают лучшую управляемость при наклонном и горизонтальном бурении.	Алмазные долота менее изучены, чем шарошечные и требуют более активных научных изысканий с целью максимально реализовать их потенциал.

PDC долота находят широкое применение в различных буровых операциях: шаблонировке, строительстве вертикальных, наклонно-направленных и горизонтальных стволов; разбуривании оснастки обсадных колонн. Эти долота могут использоваться в различных компоновках низа бурильной колонны (КНБК), включая роторные системы и винтовые забойные двигатели (ВЗД). Благодаря использованию для резания породы поликристаллических алмазных пластин PDC долота показывают во многих условиях исключительную стойкость к изнашиванию и длительный технический ресурс. Это позволяет добиваться эксплуатационных показателей алмазного бурового инструмента (проходки на одно долото, механической скорости бурения) ранее недоступных для шарошечных долот. Однако все преимущества алмазных долот ограничиваются стойкостью материалов к условиям бурения. Поэтому каждый элемент долота непрерывно совершенствуется с точки зрения рационального подбора материалов.

1.1.1 Резцы, армированные поликристаллическими алмазными пластинами

Породоразрушающие PDC резцы – одновременно являются самым прочным и самым ненадежным элементом PDC долот. Это ключевая часть долота, отвечающая за самые важные показатели бурения [22, 23, 24]: способность долота разрушать породу, длину и скорость проходки, количество спуско-подъемных операций, стоимость метра проходки. Резцы настолько важны, что пристального внимания требуют практически все нюансы связанные с ними, включая их конструктивные особенности (диаметр, длина фаски, толщина и стойкость поликристаллической алмазной пластины) [25, 26]; технология изготовления (качество сырья, режимы спекания, выщелачивание) [27]; их расположение на долоте [28] (количество резцов, угол установки); технология сборки (свойства припоя и температура пайки); условия эксплуатации (материал забоя, контактирующий с резцами, условия охлаждения, степень изнашивания режущих кромок) и мн. др. Учитывая важность PDC-резцов они были выбраны объектом исследования настоящей диссертационной работы поэтому рассмотрим их

подробнее.

Каждый PDC-резец конструктивно представляет собой монолитный продукт спекания поликристаллической алмазной пластины и твердосплавной подложки [29, 30], т.е. является композитом. Поликристаллический алмаз синтезируют в кубических прессах, путем спекания в условиях высоких давлений (5–7 ГПа) и температур (1400-1600°C) высокосортных алмазных зёрен различных фракций преимущественно в диапазоне (1...40 мкм), причем мелкие фракции используются для заполнения «пустот» между зернами крупных фракций, это увеличивает общую границу спекания зерен и уменьшает объем металла-связки, который ухудшает температурную стойкость поликристалла. В зависимости от зернистости основной фракции меняются свойства алмазного слоя. Мелкозернистая фракция (средний размер зерен 10-20 мкм) – дает наиболее высокую прочность и стойкость к изнашиванию и позволяет бурить твердые абразивные породы с умеренной скоростью. Среднезернистая фракция (20-30 мкм) обеспечивает баланс долговечности резца и скорости разрушения породы и подходит для бурения большинства типов пород. Крупнозернистые фракции (30-40 мкм) дают пониженную износостойкость, но позволяют на большей скорости бурить мягкие и средние породы.

Для армирования резцов используются алмазные пластины (чаще всего в виде цилиндрической «таблетки») толщиной 0,5...2 мм, но все чаще начинают патентоваться и использоваться алмазные слои со сложной 3D геометрией – от симметричной конусной, сфероконической и полусферической формы до асимметричной треугольной или волнистой поверхности (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – PDC резцы с поликристаллическими алмазными пластинами стандартной (а) и нестандартной (б, в) формы [13,15]

Уникальные свойства алмаза обеспечивает исключительно высокую твёрдость (> 90 ГПа) и износостойкость резца. Именно поликристаллическая алмазная пластина является конечным и самым ответственным звеном всей буровой колонны, поэтому в качестве предмета настоящего диссертационного исследования выбрана оценка стойкости алмазной пластины к изнашиванию.

Подложка имеет цилиндрическую форму и спекается из карбида вольфрама (WC) с кобальтовой связкой и легирующими добавками. Подложка служит для создания твердой опоры для алмазного слоя, передачи механической энергии от корпуса к алмазному слою, а также пайки (или механического крепления) резца на корпусе долота. Угол установки PDC-резцов на корпусе долота (*англ. backrake*) как правило, варьируется в пределах $10^\circ \dots 30^\circ$ с учетом эффективности резания породы на забое.

Наиболее частые технические решения по повышению надежности долот также связаны с PDC-резцами. Так, в работе [31] авторы указывают, что благодаря отсутствию подвижных элементов в своей конструкции, алмазные долота отличаются повышенной надежностью и длительным сроком службы при правильной эксплуатации. Такая конструкция долота существенно снижает вероятность поломок и аварийных ситуаций в процессе бурения, что ускоряет строительство скважин. Но, будет справедливо отметить, что этот же факт лишает конструкторов возможности смягчения ударных и вибрационных воздействий на резцы для более «мягкого» бурения, саморегулирования в распределении нагрузки на резцы, адаптивности к твердости разбуриваемых пород и т.д. И первые шаги по обеспечению мобильности элементов долота уже сделаны. Так, фирма ONIX [32] анонсировала новые PDC резцы с вращающейся алмазной пластиной. Это решение позволяет выводить из эксплуатации изношенные кромки резцов, заменяя их на новые участки поликристаллической алмазной пластины, практически восстанавливая исходные свойства режущего инструмента.

1.1.2 Условия эксплуатации PDC долот

Условия эксплуатации PDC долот зависят от геологического разреза, их

конструктивных особенностей, этапа применения и жесткости буровой колонны.

При спуске долота в скважину в местах изменения траектории, сужения и уступов не допускаются посадки и разгрузки более 5 т. В случае появления таковых осуществляют проработку таких мест шарошечными долотами. При спуске последней свечи долото опускают на ограниченной скорости за 1,5...2 метра до забоя включают прокачку буровой жидкости и, в случае разгрузки более 5 т долото, приподнимают на 15...30 см и 5...15 минут промывают скважину, удаляя осевший шлам, а затем медленно опускают с проработкой призабойной части ствола скважины (в этот момент могут возникать боковые колебания) [33].

Проработка и расширение ствола скважины производится на малых нагрузках и низких оборотах. Так, при роторном бурении рекомендуется нагрузка 0,5...2т, при частоте вращения 40...60 мин⁻¹. Щадящие режимы поддерживаются пока не будет пробурен интервал, равный высоте долота [33].

Разбуривание цементных стаканов и элементов оснастки обсадных колонн производится при минимальных нагрузках при максимальной подаче промывочной жидкости.

На этапе бурения используют режимы эксплуатации, указанные в паспортах к долотам с возможностью их оптимизации в соответствии с горно-геологическими условиями. В зависимости от типа привода скорость вращения при бурении составляет от 40 до 300 об/мин. В зависимости от диаметра долота максимальная нагрузка может составлять 2-30 тс [22]. Для мягких пород применяется максимальная частота вращения долота при небольшой нагрузке. При бурении пород средней твердости поддерживаются средние показатели нагрузки на долото и частоты вращения. По мере изнашивания резцов (падения механической скорости) нагрузку на долото увеличивают. В твердых породах проводят бурение при нагрузках на долото от средних до больших при оборотах от малых до средних [33].

В работе [34] также приводятся рекомендации по величине осевой нагрузки на долото: для мягких пород – 0,25...1 тс на каждые 25,4 мм диаметра долота (но не более 1,1 тс); для пород средней твердости – 0,5...1,1 тс на 25,4 мм диаметра

долота (но в пределах 1,4 тс); для твердых пород – 0,7...1,8 тс на 25,4 мм диаметра долота (но не выше 2 тс); для крепких пород – 0,9...1,8 тс на 25,4 мм диаметра долота (но не выше 2 тс).

Для неабразивных пород рекомендуемая частота вращения долота составляет 100...180 об/мин; для абразивных – 60...80 об/мин.

Признавая практическую ценность данных советов, нельзя не заметить некоторую неконкретность рекомендуемых режимов бурения. Такие рекомендации скорее служат для того, чтобы избежать грубых ошибок при эксплуатации долот и дать отправную точку для поиска оптимальных режимов бурения. Они являются скорее обобщением практического опыта, чем научно обоснованным выбором режимов бурения. Сложность в данном вопросе заключается в том, что для оценки сопротивления породы внедрению PDC-резца (т.е. твердости) не существует ни одного подходящего экспериментального метода.

1.2 Основные виды повреждений PDC-резцов при эксплуатации

В настоящее время общепринято выделять две основные формы разрушения PDC-резцов – постепенное изнашивание и хрупкий излом рабочей кромки резцов (рисунок 1.3). Это мнение основано на очевидном факте, что после наработки и извлечения алмазного долота из скважины на рабочей части поврежденных резцов можно встретить почти ровные лыски, имеющие наклон относительно оси резца такой же, как и наклон оси резца к поверхности забоя – результат изнашивания кромки резца о забой в процессе фрикционного взаимодействия вершины резца с поверхностью твердых пород на забое. Этот вид разрушения приводит к постепенному снижению агрессивности PDC-резцов и уменьшению механической скорости бурения и др. негативным последствиям. Несмотря на чрезвычайную износостойкость поликристаллического алмаза при подъеме долота можно наблюдать следы изнашивания – лыски, формирующиеся как на алмазной, так и на твердосплавной частях резцов. Величина износа заметно растет с увеличением абразивности пород. Применимость PDC долот, как правило,

ограничена бурением умеренно-абразивных пород.



Рисунок 1.3 – Повреждения PDC-резцов при эксплуатации:
1 – хрупкие сколы режущих кромок; 2 –износ режущих элементов

Несмотря на то, что износ резцов является одной из основных причин выхода долота из строя, физические механизмы формирования износа на PDC-резцах изучены недостаточно и требуют более тщательных металлургических и трибологических исследований.

Для единого описания степени износа всех резцов, выпускаемых множеством фирм в разных странах, международная ассоциация буровых подрядчиков (IADC) разработала универсальную кодировку [35]. Эти данные (о режимах и результатах бурения) заносятся промысловиками в паспорт долота после его отработки на забое и отправляется на завод – изготовитель, где эту информацию анализируют для дальнейшего совершенствования конструкции PDC долот и уточнения рекомендаций по их рациональному использованию. Например, «слом алмазной пластины/вставки по шву (отслаивание таблетки

PDC)» имеет код BF, а «потеря резца (зубка)» – код LT. Нормальный абразивный износ резцов по высоте обозначается кодом WT (WornTeeth).

Часто наблюдаются повреждения PDC-резцов в виде неровных хрупких сколов, которым подвержены и алмазная пластина, и твердосплавная подложка. Их образование связывают с высокими статическими и динамическими нагрузками (вследствие боковых, осевых и крутильных вибраций, создающих на режущей кромке резца циклические ударные нагрузки). Разновидности такого повреждения могут принимать разные формы: хрупкие сколы режущих кромок, сколы алмазного покрытия вместе с телом резца, отколы алмазного покрытия от резца. Хрупким изломам способствует и материал резцов, имеющий малую пластичность при высокой жесткости и твердости; и технологии его финишной обработки выщелачиванием (растворением пластичной связки); и ударный характер взаимодействия с породой. Хрупкие разрушения, так же, как и изнашивание могут иметь различную природу – от обычного слома до развития усталости, и требуют более тщательного изучения. В кодировке IADC следует различать два вида обозначений, связанных с хрупким разрушением – СТ («скол элементов вооружения») и ВТ («слом элементов вооружения») [35]. Резец «считается сколотым (в отличие от сломанного), если оставшаяся его часть выступает над телом лопасти. Если нет, то резец считается сломанным» [36, 37, 38]. Такое разграничение лишь определяет степень внешнего повреждения резца, но не дифференцирует механизмы повреждаемости материала.

Наиболее часто на долотах можно встретить комбинированные повреждения с различной степенью выраженности: от практически целых, до полностью разрушенных. Оба вида разрушения встречаются приблизительно с одинаковой частотой [39] и начинаются с вершины рабочей кромки (зона концентрации напряжений), а затем переходят в твердосплавную основу. Поскольку оба механизма действуют одновременно, часто и повреждения имеют двойственные признаки: хрупкие сколы, сглаженные процессом изнашивания. Реже наблюдаются и другие причины отказов долот, связанные с PDC-резцами, например, их выпадение из-за некачественной пайки или эрозии припоя.

По ряду причин изнашивание считается предпочтительным, «нормальным» механизмом повреждения резцов, поскольку данный процесс является относительно медленным и равномерным и поэтому – предсказуемым. Хрупкое разрушение может появиться в любой момент и охватывает гораздо больший объем, чем изнашивание, и может сразу вызвать катастрофическое изменение геометрии резца, приводящее к его отказу. Вследствие этого появление хрупких сколов на рабочих кромках PDC-резцов в работе [39] получили название аномального, преждевременного износа.

Подобное разделение механизмов повреждения резцов отражает очевидные различия, но не раскрывает физическую сущность протекающих явлений, поскольку существует много видов изнашивания, так же, как и хрупкие сколы могут быть следствием различных разрушающих процессов.

Еще один, более редкий, вид разрушения резцов, связан с термическим растрескиванием, которое наблюдается при перегреве резцов (преимущественно в калибрующей части долота) из-за износа рабочих кромок и длительного скольжения по породе при форсированных режимах бурения (высоких частотах вращения долота с повышенной осевой нагрузкой) с последующим сломом резцов. Поэтому данный вид повреждения, хотя и выделяется в отдельный вид, можно считать частью процесса отказа долота по причине изнашивания. Он указывает на то, что эксплуатация долот, «посаженных» на изношенные кромки резцов не только могут снизить эффективность бурения (вплоть до нуля), но и несут в себе дополнительные риски слома резцов и попадания в зону резания сверхтвердых обломков. Гораздо более опасным термическим фактором повреждаемости резцов является их пайка высокотемпературными припоями к корпусу долота, поскольку этой процедуре подвергаются 100% новых резцов, поступающих на сборку PDC долот.

1.2.1 Проблемы прогнозирования работоспособности алмазных резцов с учетом их фактического износа

Несмотря на все усилия по повышению долговечности PDC-резцов следует признать, что изнашивание режущих элементов является естественным и неустраняемым процессом при бурении любых, но в особенности, абразивных пород. Для того, чтобы оценить возможность осуществления долотом безотказной работы в общем случае необходимо ответить на следующие вопросы: 1) пригодно ли для выполнения поставленной задачи долото или требует замены или ремонта; 2) какой прогноз механической скорости бурения данным оборудованием в данных горно-геологических условиях; 3) как оценить скорость изнашивания режущих кромок резцов при бурении данной породы; 4) какие технико-экономические критерии рациональности проведения буровых работ с полученными показателями.

За почти полувековую историю эксплуатации PDC долот не все указанные вопросы нашли исчерпывающие научно-обоснованные ответы.

По вопросу пригодности отработанных долот к дальнейшей эксплуатации в нефтегазовой отрасли создаются специальные руководства. Ранние документы AAODC [40, 41] были разработаны для анализа степени износа шарошечных долот и оказались непригодными для оценки износа PDC долот. В настоящее время используется визуальная оценка степени износа PDC долот с использованием кодов ВНИИБТ [37] и IADC [35, 40, 42] и далее, опираясь на технико-экономические показатели, оператор оценивает состояния долота одной из трех групп: пригодных к дальнейшей эксплуатации, нуждающихся в ремонте и подлежащих утилизации. Однако специалисты отмечают [43], что «большое количество показателей основных и второстепенных видов износа, характеризующих состояние долота, вместе с отсутствием четких, понятных эксперту рекомендаций при принятии решения о пригодности долота к дальнейшей работе затрудняет использование кода IADC для визуальной оценки износа долот в промысловых условиях. В частности, момент окончания обработки долота PDC по коду IADC является произвольным решением каждого оператора,

который полагается не столько на полученные в результате осмотра многочисленные показатели износа, сколько на свой опыт, знания и интуицию». Подобная практика требует поисков научно-обоснованных критериев оценки работоспособности бывшего в употреблении долота.

Так, в руководстве, разработанном компанией ООО «ПетроИнжиниринг» предлагается методика определения целесообразности дальнейшей эксплуатации PDC долота в промысловых условиях, в основу которого легли наблюдения за износом сотен долот месторождениях Западной Сибири и анализ эксплуатационной документации (дефектоскопических актов, карточек отработки долот, ремонтных смет), а также экспертные мнения профильных специалистов различных компаний [43]. Данная технология предполагает не только оценивать пригодность долота к дальнейшей работе по степени износа, но и на основании экономических расчетов оценивать рентабельность его ремонта (если затраты на его ремонт не превышают 20...30% от стоимости нового долота) или необходимость утилизации (если затраты на ремонт достигают 70...80% от стоимости нового долота). Анализ состояния долота основан на визуальном осмотре и оценке износа пяти основных элементов, оказывающих наибольшее влияние на состояние долота: PDC-резцов, посадочных гнезд, промывочных элементов, диаметра долота и состояния резьбы. При подсчете резцов, требующих замены, таковыми считаются все режущие элементы с заметными повреждениями вне зависимости от их величины и природы. Считается, что если доля поврежденных резцов на долоте составляет более 60% от всех породоразрушающих резцов, то эксплуатацию долота следует завершить до принятия решения о целесообразности его восстановления или утилизации. При этом отмечается, что эксплуатация долот у которых доля целых резцов не превышает 40% связана с заметным ухудшением всех эксплуатационных показателей. Надо отметить практичность и экономическую обоснованность данного руководства, но любое ли повреждение резца следует считать основанием для его замены с учетом того, что это самая дорогостоящая статья ремонта? И как при этом учитываются особенности геологического разреза?

В методике, принятой в НПП «Буринтех» [38] долота считаются непригодными и подлежат выводу из эксплуатации, в случае если: диаметр долота уменьшился на 2...3 мм (в зависимости от типоразмера); износ резцов вызвал заметное уменьшение механической скорости бурения; наблюдается перегрев резцов по всей поверхности, также при значительном разрушении одного или нескольких резцов. Данные рекомендации также не отличаются однозначной четкостью для использующего их оператора с недостаточным опытом.

Рассмотренные подходы к анализу износа резцов основаны на изучении уже имеющихся повреждений, но как подойти к прогнозированию работоспособности режущих элементов долот? Для ответа на этот вопрос существуют различные модели прогнозирования [44-47], включая методы, основанные на использовании искусственного интеллекта. Так, в работе [48] предложена двухступенчатая нейросетевая модель, которая на первой ступени оценивает скорость бурения, а на второй – прогнозирует процент поломок PDC-резцов. Инженеры компании Schlumberger используют современный комплекс динамического моделирования IDEAS [49], позволяющий оптимизировать конфигурацию режущих элементов долот на основе проведения геофизических исследований и анализов шлама.

Вопрос о прогнозировании скорости бурения требует ответа на другой вопрос: как глубоко врежется режущая кромка в породу с учетом постепенного изнашивания резцов, их типоразмера, количества и расположения на долоте. Этот вопрос также требует исследований.

1.3 Проблемы управления качеством PDC-резцов

Увеличение срока службы PDC-резцов играет важную роль в бесперебойной работе долота в конкретных условиях и является приоритетной задачей алмазного производства и ключевым моментом повышения эффективности бурения. Рассмотрим, какие ресурсы нам при этом доступны.

Известно множество конструкторско-технологических решений для повышения прочности PDC-резцов на стадии конструирования. PDC резцы

крупного размера (19...25мм) являются более эффективными с точки зрения разбуривания горной породы, но вызывают усиление колебаний крутящего момента и провоцируют образование сколов. Оснащение долот резцами меньшего диаметра (8...16 мм) приводит к улучшению стойкости к ударным нагрузкам и увеличению механической скорости бурения. С уменьшением размеров резцов уменьшается и вырабатываемый при бурении шлам, что облегчает промывку забоя.

На этапе изготовления долот с PDC-резцами имеются следующие рекомендации [50]:

1) Для улучшения прочности соединения поликристаллической алмазной пластины с твердосплавной подложкой на границе их соединения используют особый «зубчатый» рельеф сопрягаемых поверхностей (рисунок 1.2 в) [51, 52]. Это обеспечивает более надежную фиксацию и повышает общую прочность резца.

2) При спекании поликристаллических алмазов используют разные фракции алмазных порошков. Для минимизации содержания кобальта пространство между зёрнами заполняется алмазной пылью (алмазным порошком микронных размеров).

3) Готовые PDC резцы подвергают выщелачиванию [53] – глубокому вытравливанию кобальтовой связки в горячей смеси сильных кислот, что несколько повышает температурную стойкость резцов.

4) Используются технологии нанесения защитных покрытий на поверхность резцов [54, 55].

5) Совершенствуются технологические режимы спекания поликристаллических алмазных пластин в кубических прессах для обеспечения более высокого и стабильного качества композита.

6) Оптимизируется толщина и форма алмазной пластины на режущей кромке.

На этапе эксплуатации управление сроком службы алмазных резцов долота включает в себя следующие рекомендации [22, 33, 37, 38]:

1. Максимально использовать долота на протяженных участках однородных пластов (по твердости от мягких до средних).

2. Избегать бурения слоев гравия, и чередующихся мягких и твердых пластов.
3. Использовать оптимальные режимы бурения. Например, осуществлять бурение преимущественно не за счет высокого давления на долото, а за счет скорости вращения.
4. Не применять долото при наличии на забое металлических предметов. В этом случае необходимо предварительное проведение ловильных работ.
5. При спуске долота в скважину производить приработку забоя на малых частотах вращения, после чего можно переходит к нормальному режиму бурения.
6. Использовать корректные, научно-обоснованные критерии определения фазы изнашивания долота, при которой его эксплуатация становится нецелесообразной, а также выбирать рациональные методы ремонта долота.
7. Производить предварительный тщательный анализ литологии и изучение опыта отработки долот на соседних скважинах.
8. По мере необходимости выполнять ремонтные работы по замене или перепайке PDC-резцов.

Изготовлением PDC-резцов занято множество фирм по всему миру [56, 57, 58], но в России отсутствуют собственные производители данных изделий и в долотном производстве используются резцы зарубежного производства. Это сильно ограничивает возможности управления качеством алмазных долот, поскольку оно находится в прямой зависимости от качества поставляемых партий PDC-резцов. Однако, если ресурс управления качеством до конца не исчерпан – остается возможность проведения входного контроля качества резцов, поставляемых на сборку (с возможностью отбраковки некачественных партий), оптимизация конструкций, технологий изготовления и ремонта алмазных долот, совершенствования критериев оценки работоспособности алмазных долот, а также соблюдения правил их рациональной эксплуатации. Рассмотрим технико-технологические решения проблемы испытаний резцов на изнашивание для входного контроля их качества.

1.3.1 Обзор специализированного оборудования и методов испытаний породоразрушающих элементов PDC долот на стойкость к поверхностному разрушению

Известно, что в подавляющем большинстве случаев долговечность PDC-резцов лимитирует срок службы всего алмазного долота. Производство резцов связано с порошковыми технологиями, которые, как известно, даже при соблюдении всех регламентов приводят к получению материалов, имеющих некоторый разброс механических свойств из-за высоких градиентов механических напряжений и температур. Таким образом, совершенно недопустимо при изготовлении долот применение резцов, не прошедших предварительно входной контроль, который должен стать необходимым этапом реализации системы качества на долотном производстве. Несмотря на отсутствие международных норм и стандартов на оценку качества алмазных резцов практически каждая крупная долотостроительная фирма, имеющая алмазное производство, вынуждена разрабатывать свои критерии, методики и установки для анализа их надежности и возможности отбраковки партий резцов с недостаточными прочностными свойствами.

При входных испытаниях должны подвергаться контролю, прежде всего, те свойства поликристаллического алмазного слоя, от которых непосредственно зависит эксплуатационная надежность резцов.

При этом уместно вспомнить опыт проведения аналогичных работ, когда требовалась оценка стойкости к изнашиванию твердосплавных зубков шарошечных долот [59,60, 61, 62].

Стандарт DIN 50330 [63] предлагает оценивать износостойкость материалов по результатам изнашивания испытуемого образца при сухом трении по вращающемуся корундовому диску. Схема установки приведена на рисунке 1.4. Реализуемый фрикционный контакт: «палец-диск». Методика используется фирмой Сандвик Коромант в системе оценки качества твердых сплавов. В качестве критерия используется относительная износостойкость, обратно пропорциональная весовому износу образца. Идея применения в качестве

контртела не горной породы со случайными неоднородностями и нестабильностью свойств, а искусственно созданного абразивного материала – удачное решение, которое находит отражение и в современных исследованиях алмазных резцов. Недостатком данной схемы испытаний является неодинаковая скорость трения образца о контртело в центральной и периферийной части диска. Кроме того, можно отметить, что износостойкость поликристаллических алмазных пластин намного выше, чем у твердых сплавов, что приведет к быстрому износу дорогостоящего диска.

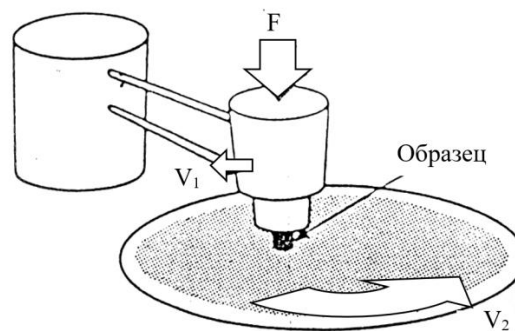


Рисунок 1.4 – Установка для оценки износостойкости твердых сплавов по DIN 50330

В РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина было изготовлено специальное оборудование [64] для испытаний твердых материалов, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания (рисунок 1.5), к слову, характерного и при эксплуатации PDC долот.

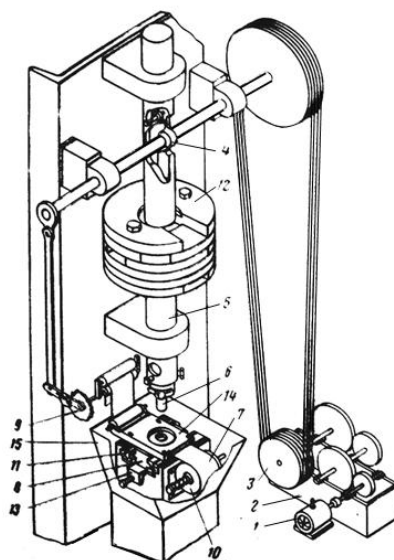


Рисунок 1.5 – Схема испытательного стенда для оценки стойкости материалов к ударно-абразивному изнашиванию (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина). Основные элементы стенда: 1 – электропривод, 2 – цилиндрический редуктор, 3 - ременная передача, 4 – вращающийся кулачок, 5 – шпindelь, 6 – испытываемый образец, 7 – ленточная абразивная шкурка, 8 – наковальня, 9 – храповик, 10 – катушка, 11 – вкладыш, 12 – груз, 13 – приспособление для обеспечения постоянства расстояния от торца образца до наковальни, 14 - прижим, 15 – кожух

Установка позволяет имитировать удары образца по абразиву, закрепленному на шкурке с частотой 60...100 ударов в минуту. Ударные нагрузки реализуются за счет свободного падения образца с грузом с высоты 50 мм на лежащую на стальной наковальне электрокорундовую абразивную шкурку. Между ударами шкурка проскальзывает по наковальне на некоторое расстояние так, чтобы каждый удар приходился на неповрежденную поверхность шкурки. Таким образом подача шкурки осуществляется в прерывистом режиме, в то время как для имитации работы PDC-резцов было бы более адекватно проводить испытания в режиме удара с проскальзыванием. Идею использовать в качестве абразивного материала шлифовальную шкурку не целесообразно адаптировать к испытаниям PDC-резцов из-за ее непомерно высокого расхода с учетом высокой износостойкости алмаза. Рациональное зерно, которое можно почерпнуть в данной разработке заключается в том, что данная схема позволяет оценить стойкость материала в условиях усталостного накопления повреждений.

Позже в этом же университете под руководством профессора Виноградова В.Н. была изготовлена еще одна модификация установки для испытаний

материалов на ударно-абразивное изнашивание (рисунок 1.6), которая принципиально отличается от предыдущей лишь в том, что вместо шлифовальной шкурки на наковальню перед ударом наносится слой кварцевого песка зернистостью ~ 1 мм, толщиной 1 мм [64]. Для этого используются специальные приспособления, осуществляющие автоматическую подачу свежей порции кварцевого песка и удаление отработавших песчинок. Другими словами, в данном случае реализуется изнашивание образца о слой незакрепленных абразивных частиц. Использование натурального порошкообразного абразива – неплохая идея, которую можно встретить и в других методах испытаний.

Существует большое количество стандартных методов и устройств для испытаний материалов на абразивное и ударно-абразивное изнашивание [65], описанных в ГОСТ 23.208-79, а также в аналогичных зарубежных стандартах ASTM G65, ASTM B611, ASTM G105 [66, 67, 68]. Две схемы испытаний показаны на рисунке 1.7.

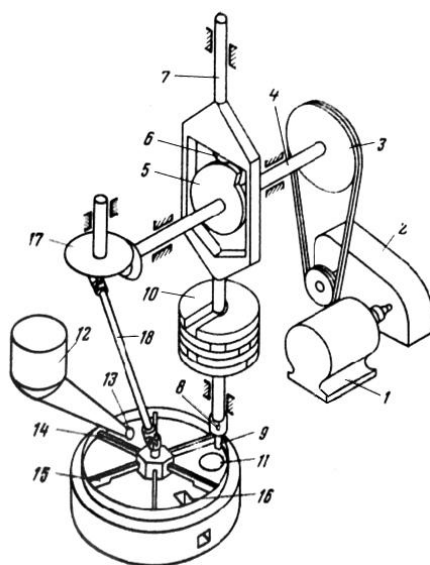


Рисунок 1.6 – Схема установки для испытаний на ударно-абразивное изнашивание Виноградова М.Н. [64]: 1 – электропривод, 2 – понижающий редуктор, 3 – ременная передача; 4 – вал; 5 – кулачок; 6 – ролик, 7 – шпиндель, 8 – образцедержатель, 9 – испытуемый образец, 10 – груз, 11 – наковальня, 12 – емкость с абразивом, 13 – дозатор, 14 – ножи, 15 – щетки, 16 – бункер, 17 – коническая передача

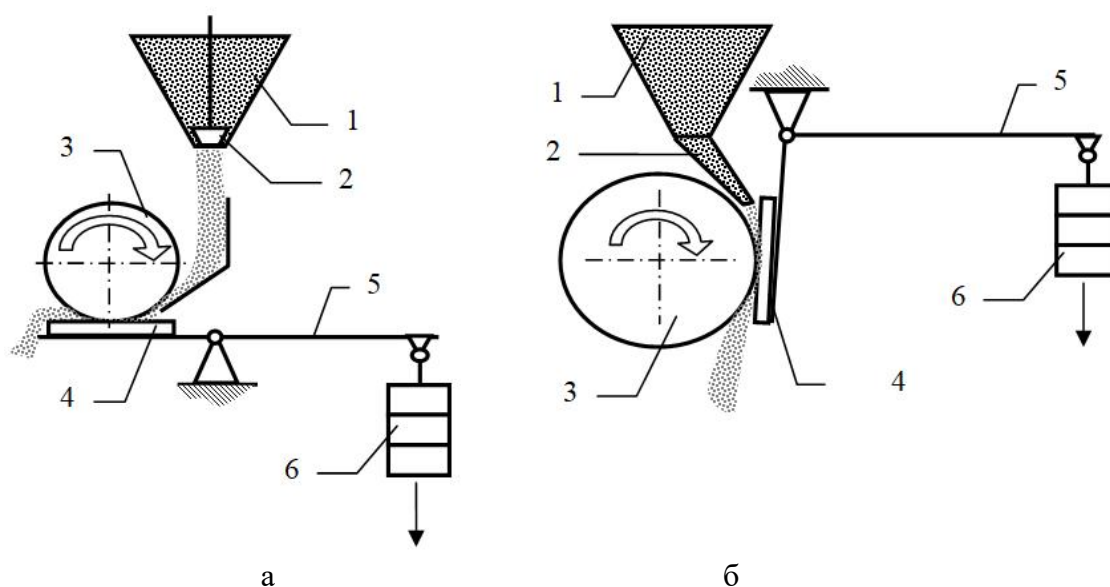


Рисунок 1.7 – Схемы стандартных испытаний на абразивное изнашивание о незакрепленный абразив: а) согласно ГОСТ 23.208-79; б) согласно ASTM G105. 1 – емкость с абразивом; 2 – регулируемое сопло для подачи абразива; 3 – контртело (резиновое колесо); 4 – испытываемый образец; 5 – рычаг с оправкой для крепления образца; 6 – груз

При стандартных испытаниях образец (пластину шириной 30 мм, длиной 30...50 мм и толщиной ≥ 1 мм) – прижимают с усилием $44,1 \pm 0,25$ Н к цилиндрической поверхности резинового колеса диаметром 48...50 мм и шириной $15 \pm 0,1$ мм, вращающегося с частотой 60 ± 2 мин⁻¹. В зону трения начинают подавать абразив (электрокорунд зернистостью №16-П) в объеме, достаточном для равномерного распределения по поверхности трения. Нарботка до завершения испытаний определяется числом полных оборотов резинового колеса и составляет: 600 оборотов - при твердости образца не более 400 единиц по Виккерсу; 1800 оборотов – при 400...800HV; 3600 оборотов – при >800HV. Износостойкость материала определяют весовым методом (по потере массы образца) и сравнения полученного результата с эталоном. Можно отметить, что данные методы отличаются простотой реализации, но в них отсутствует имитация ударов, а применительно к испытаниям PDC-резцов резина, как контртело – нехарактерный материал.

В ГОСТ 23.207-79 [69] описана конструкция испытательного стенда для оценки стойкости материалов к ударно-абразивному изнашиванию о незакрепленный абразив. Установка (рисунок 1.8) позволяет осуществлять

периодические удары образца по наковальне (массой 50 кг) через слой абразивных частиц с частотой 20...400 мин⁻¹с энергией удара в диапазоне 2,94...29,4 Дж. Скорость удара образца при ударе регулируется в пределах 0,5...5 м/с.

Испытания завершаются после 1000 ударов. Стойкость образцов оценивается по потере массы с погрешностью не более 0,0002 г.

Совершенствование данной установки, предложенное сотрудниками Южно-Российского государственного технического университета, приведено в патенте РФ № 2434219С2 [70]. Их установка позволяет дополнительно проводить испытания на ударно-гидроабразивное изнашивание.

В ГОСТ 23.212-82 [71] описана конструкция установки для испытаний образцов на ударно-абразивное изнашивание о закрепленный абразив при низких температурах, где в качестве абразивного контртела используется абразивная лента.

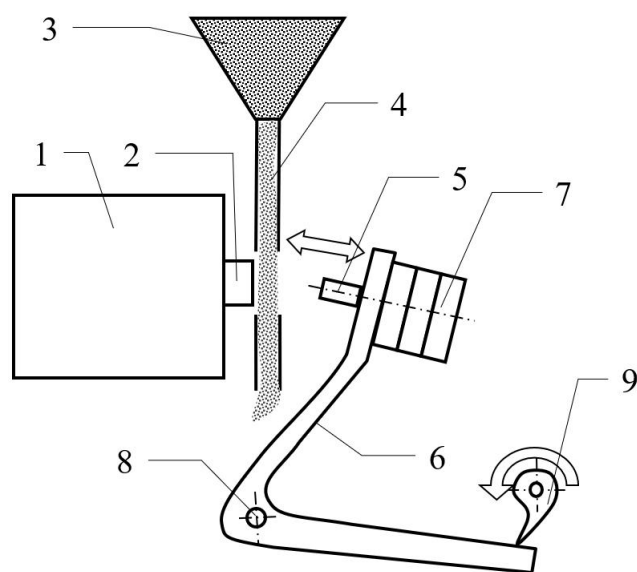


Рисунок 1.8 – Установка для испытаний на ударно-абразивное изнашивание по ГОСТ 23.207-79

Интересен опыт испытаний трехшарошечных долот в условиях опытного бурения стального слитка. Такой метод практиковался в исследовательской лаборатории ОАО «Волгабурмаш». Бурение металлической поверхности позволяло оценить стойкость долота при минимальном расходе материала

данного «забоя». Этот опыт весьма целесообразен и при испытаниях PDC-резцов поскольку данный метод позволяет варьировать твердость и абразивность контртела. Примером тому служат исследования, проведенные в настоящей диссертации, а также в работе [6].

Переходя к современным методам испытаний PDC-резцов на изнашивание, классическим решением является оценка весового износа натуральных резцов, заключенных в специальную оправку (в форме резцедержателя) при резании горных пород, чаще всего – гранита. Такой метод сначала «прижился» у зарубежных производителей резцов и затем внедрился в отечественные исследовательские лаборатории. Так в ОАО «Волгабурмаш» и в работе других исследователей [72] практиковались методы оценки стойкости зубков к истиранию, при котором на токарный станок устанавливали гранитную заготовку (рисунок 1.9) и точили ее специальным резцом, в котором вместо сменной режущей пластины устанавливали испытуемый PDC-резец так, чтобы его режущая кромка располагалась на месте режущей кромки токарного резца. Таким образом, происходила имитация работы PDC-резца на забое. Недостатками данного метода являются высокие длительность и стоимость испытаний, а также низкая надежность крепления гранитной заготовки. Позже испытания резцов стали проводиться на установке на базе карусельного станка с более надежным креплением заготовки. В настоящее время это наиболее применяемая схема испытаний, однако «слабым звеном» в ней является природный гранит, твердость которого может кратно меняться от образца к образцу. Поэтому поиски новых методов испытаний не прекращаются.



а



б

Рисунок 1.9 – Исследования износостойкости PDC-резцов в ОАО «Волгабурмаш»: а – гранитные заготовки (контртело); б – общий вид установки для испытаний резцов на стойкости к изнашиванию на базе токарного станка

В диссертации К.В. Борисова [39] приведены результаты разработки двух испытательных стендов. Стенд для определения износостойкости PDC-резцов (рисунок 1.10) УИМ-2 изготовлен на базе горизонтально-фрезерного станка НГФ-110Ш4, оснащенного нагрузочным приспособлением и механизмом подачи. Натурный образец PDC-резца фиксируют в державке нагрузочного приспособления и изнашивают о поверхность шлифовального круга ПП 300×35×127 6377К3 40СМ1, вращающегося с частотой 50 об/мин. Давление на режущую кромку не превышает 18 МПа. Длительность испытаний – 20 минут. Можно признать, что на настоящий момент – данный метод дает максимальную производительность исследований, но выбор для оценки стойкости к изнашиванию величины линейного износа имеет тот минус, что при одинаковом линейном износе резцы разного диаметра будут иметь различную потерю массы и результаты испытаний для разных форм и типоразмеров резцов будут фактически несопоставимы (либо потребуют различных критериев оценки качества). Однако для целей, поставленных в работе [39], данный стенд несет в себе рациональное техническое решение.

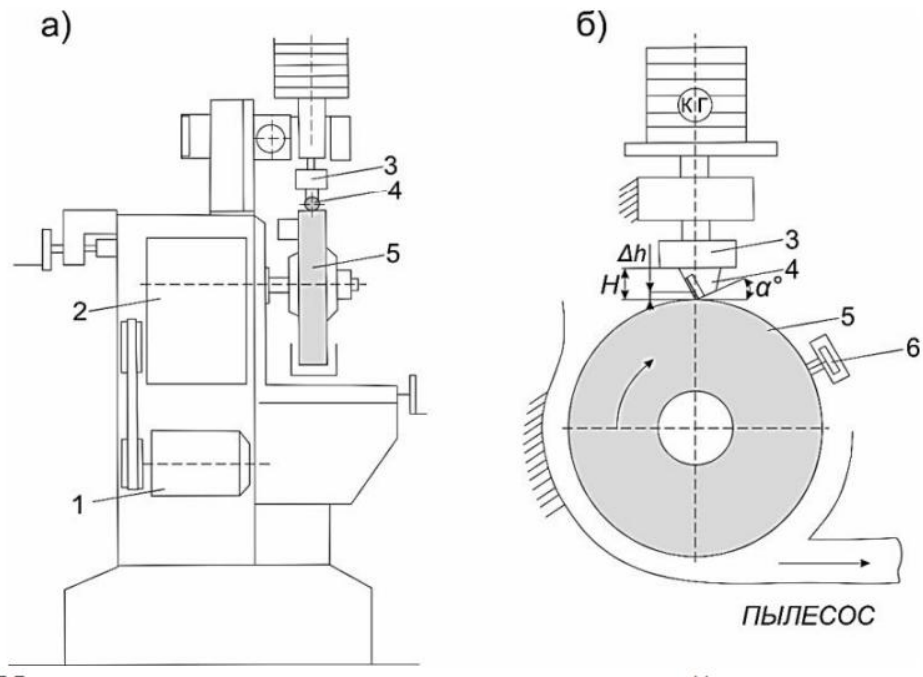


Рисунок 1.10 – Установка для ускоренных испытаний материалов УИМ-2: а) схема установки; б) схема блока нагружения и истирания PDC-резцов, 1 – электродвигатель; 2 – понижающий редуктор; 3 – державка; 4 – образец; 5 – абразивный круг; 6 – счетчик пути

Для оценки ударной вязкости резцов разработана установка, схема которой приведена на рисунке 1.11 [39]. Стенд представляет собой конструкцию, объединяющую гидравлический пресс (для создания высокой осевой нагрузки), маятниковый копр (для воспроизведения тангенциальной ударной нагрузки) и испытательный узел, лежащий на роликовой опоре. Испытательный узел формирует контакт режущей кромки резца с «породой». «Порода» или «забой» смоделированы пластиной из инструментальной стали У8А.

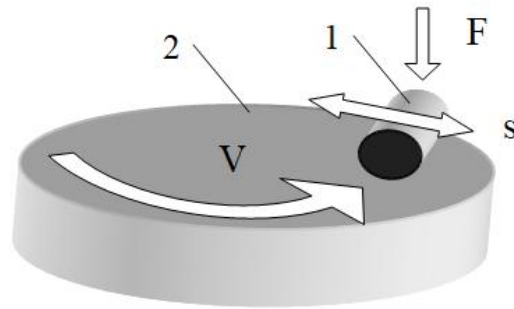


Рисунок 1.12 – Схема испытаний резцов на изнашивание:
 1 – испытуемый резец; 2 – контртело (гранитный камень); F – нормальная нагрузка; s – поперечная подача; V – скорость вращения подвижного контртела

Подобное оборудование для испытаний PDC-резцов использовали фирмы LANDS Superabrasives, Е6, ООО «Дрилинг Индастриал Системс», ОАО «Волгабурмаш» и др. Например, фирма Е6 [73] испытывает PDC резцы на стойкость к изнашиванию путем обтачивания гранитного образца (с пределом прочности не менее 220 МПа, мелкозернистой или среднезернистой структуры) при частоте вращения 54 об/мин (40-160 м/мин), глубине резания 0,25 мм и скорости подачи 4,5 мм/об с водяным охлаждением.

В работе [39] приведена методика испытаний PDC-резцов на изнашивание при трении о гранит с учетом профиля забоя. Режимы испытаний: шесть уровней проходки за один оборот резца $\delta = 0,28, 0,4, 0,56, 0,8, 1,12, 1,6$ мм при частоте вращения 90 мин^{-1} . Промывка осуществляется технической водой. Данные испытания привлекательны созданием условий, максимально схожих с эксплуатационными. Но в процессе бурения поддерживается заданная осевая нагрузка на долото и на резцы в частности. Если испытания проводятся при постоянной глубине внедрения это приводит к постоянным изменениям осевых нагрузок, что создает неопределенность режимов нагружения резцов при испытаниях. Выбор гранита или мрамора в качестве материала «забоя» обусловлен тем, что данные материалы за счет высокой абразивности и твердости позволяют оценить износ резцов в относительно короткие сроки. Однако природные материалы обладают неоднородной (слоистой) структурой по глубине, что с учетом большой продолжительности во времени проводимых испытаний,

может привести к появлению погрешности в измерениях в зависимости от местоположения истираемого слоя «забоя».

Для решения данной проблемы в работе [73] в качестве контртела при испытаниях предложено использовать искусственные абразивные материалы – шлифовальные круги марки 64С (карбид кремния), которые за счет повышенной твердости ускоряют процесс изнашивания.

Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время отсутствует общепринятая методика испытаний резцов на изнашивание. Это не позволяет сопоставлять результаты разных исследователей и подтверждать заявленное качество изделий. Для перехода к возможности сертификации качества резцов по критерию стойкости к изнашиванию необходимо определить перечень подтверждаемых показателей и их диапазоны или предельные значения, соблюдая единство условий проведения испытаний и измерений. При этом целесообразно дополнить арсенал натуральных методов испытаний резцов более простыми и оперативными методами лабораторных испытаний, цель которых – не определить скорость изнашивания резцов при эксплуатации, а только дать сравнительную оценку износостойкости поликристаллических алмазных пластин на кромках резцов при сохранении схемы испытаний, приемлемом форсировании механических напряжений и увеличении агрессивности контртела для максимально быстрого проведения сравнительного анализа. Все другие факторы – величина нагрузки на резец, угол наклона резца к контртелу, скорость вращения «забоя» и др. выбираются постоянными, чтобы скорость изнашивания PDC-пластины зависела только от свойств самой пластины на испытываемом резце.

1.4 Выводы по 1-й главе

Проведенный литературный обзор существующих методов и средств контроля стойкости PDC-резцов к изнашиванию показал, что в настоящее время преобладает натуральный подход к испытаниям с использованием в качестве контртела реальных горных пород, в частности гранитного камня. Данный подход создает при трении условия, адекватные реальным условиям эксплуатации резцов,

что является его несомненным достоинством.

Однако с данным методом сопряжены трудности для возможности его использования на долотостроительных предприятиях для входного контроля качества PDC-резцов перед сборкой алмазных долот, связанные с большой длительностью получения экспериментальных результатов. На одно испытание требуется время от нескольких часов до нескольких суток. Использование гранитного камня не только приводит к экономическим затратам, но и создает определенные трудности в части нормирования его характеристик. Природный камень неоднороден, имеет различающуюся в разы прочность и может содержать нерегламентированное количество дефектов. Кроме того, в ходе данных испытаний создается большое количество пыли и требует отдельного помещения.

Перспективными являются исследования, в которых вместо натурального материала забоя предлагаются искусственно созданные абразивные материалы, позволяющие за счет повышенной твердости абразивных частиц добиваться более быстрого изнашивания PDC-резцов. При этом тот факт, что шлифовальные круги изготавливаются по определенной технологии, регламентированной техническими условиями, создает предпосылки для улучшения воспроизводимости результатов испытаний.

Поскольку алмазные пластины относятся к сверхтвердым материалам, то наибольшее истирающее воздействие на него могут оказать искусственные алмазосодержащие материалы, изготавливаемые по определенной технологии. Подобные металл-алмазные композиты используются в качестве рабочего слоя в алмазных шлифовальных кругах и алмазных отрезных дисках, причем использование дисков имеет значительное преимущество в экономическом плане.

Однако подобных исследований до сих пор не проводилось, что требует разработки специализированного испытательного стенда и методики испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению об алмазосодержащий металлический «забой», которые могли бы найти широкое применение в сертификационных испытаниях резцов на этапе входного контроля их качества.

Для обоснования адекватности сертификационных испытаний важно, чтобы

механизмы разрушения поверхности при трении PDC-резцов в лабораторных условиях были идентичны физическим механизмам разрушения поликристаллической алмазной пластины при эксплуатации на забое. Можно констатировать, что современные представления, связанные с эксплуатационным изнашиванием PDC-резцов основаны на предположении о том, что ведущим видом изнашивания является абразивное изнашивание. Это предположение не лишено оснований, поскольку работа долота происходит в условиях непрерывного контакта резцов с абразивными породами (закрепленный абразив), а также с потоком взвеси частиц разбуренной породы в буровом растворе (незакрепленный абразив). Однако вывод об абразивном механизме изнашивания поликристаллических алмазов не подтвержден научными исследованиями и не так очевиден, как может показаться на первый взгляд, поскольку абразивное изнашивание имеет совокупность признаков (паттерны поверхности трения, соотношение твердости материала и абразивной среды и др.), которые пока либо не изучены, либо противоречивы. Поэтому целесообразно использовать фрактографический анализ изношенных поверхностей PDC-резцов на разных масштабных уровнях. Хотя в литературе имеется множество изображений разрушенных участков поверхностей резцов, но все они скорее подтверждают факт существования данного вида разрушения, чем объясняют физическую природу разрушения поликристаллических алмазов при трении.

Несмотря на механизмы разрушения поликристаллических алмазов при трении неоспоримым является тот факт, что процесс деградации материала происходит в поле высоких механических воздействий. Известно, что в определенных пределах можно говорить о пропорциональности степени износа и контактных давлений, действующих на границе «резец – забой». Для углубленного анализа физико-механических условий фрикционного контакта PDC-резцов с забоем часто используют компьютерные модели трения поликристаллической алмазной вставки по поверхности забоя. Данные модели позволяют оптимизировать условия контакта в зависимости от углов атаки, размеров фасок, глубины резания и др. параметрам. Почти все численные

исследования используют в качестве материала забоя гранитный камень. Поэтому контактные давления при трении о гранит хорошо изучены. Однако до сих пор не проводился численный анализ фрикционного контакта PDC-резца с алмазосодержащим «металлическим» забоем, что очень важно в целях определения возможностей форсирования лабораторных сертификационных испытаний за счет трения о более прочную металлическую связку. Повышение твердости забоя также ведет к его меньшему истиранию и более стабильным условиям испытаний.

Центральным вопросом при создании способа сертификации PDC-резцов по стойкости к истиранию является вопрос ранжирования их качества. Для этого необходимо разработать объективные критерии, которые должны быть основаны на исследовании стойкости к изнашиванию PDC-резцов, относящихся к различным классам качества, произведенных различными поставщиками, так, чтобы поступающие на исследование резцы могли быть отнесены к определенной группе качества, отражающей реальные эксплуатационные свойства изделия. Существующие в настоящее время критерии изнашивания PDC-резцов основаны на геометрических изменениях резца (высота, ширина, износ боковой грани и т.п.) и критерии, основанные на физических свойствах (твердости, шероховатости и т.п.) затрагивают только износ, полученный в условиях эксплуатации, и используют для кодировки степени износа породоразрушающего инструмента. Для сертификационных испытаний требуется создать свою базу данных изнашивания резцов, позволяющую соотнести стойкость испытуемого резца с показателями скорости изнашивания других PDC-резцов.

Завершающим этапом обоснования сертификационных испытаний PDC-резцов на стойкость к истиранию является установление корреляции между данными лабораторных испытаний и эксплуатационной стойкостью резцов на основе проведения сличительных экспериментов. Традиционно сличительные эксперименты проводятся путем лабораторных испытаний новых изделий с получением некоторого прогноза эксплуатационных свойств и последующим сопоставлением полученного прогноза с реальным ресурсом при эксплуатации.

Однако, учитывая уникальность геологических особенностей каждой скважины и режимов бурения, такой поход сопряжен с большими трудностями, поскольку отсутствуют реальные возможности испытания алмазных долот с PDC резцами, входящими в разные группы по стойкости к изнашиванию в аналогичных эксплуатационных условиях. Поэтому для проведения сличительного эксперимента PDC резцов требуется разработка нового подхода.

Цель и задачи диссертационного исследования

На основе проведенного аналитического обзора была сформулирована цель диссертационного исследования, заключающаяся в установлении закономерностей влияния состава и структуры поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов на механизм и интенсивность их поверхностного разрушения при эксплуатационных механических воздействиях, а также в разработке материаловедческих критериев, методов контроля и средств сертификационных испытаний для повышения достоверности оценки качества PDC-резцов буровых долот.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Установить физико-механические закономерности поверхностного разрушения поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов буровых долот при эксплуатации.
2. Установить влияние химического состава, содержания металлической связки и размера алмазных зерен поликристаллических алмазных пластин на стойкость к поверхностному разрушению.
3. Разработать материаловедческий критерий предельного состояния PDC-резцов, связывающий твердость разбуриваемой породы, степень поверхностного разрушения поликристаллической алмазной пластины и работоспособность режущей кромки.
4. Разработать методику и специализированное оборудование для сертификационных испытаний поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов по критерию стойкости к поверхностному разрушению.
5. Разработать классификацию PDC-резцов по стойкости

поликристаллических алмазных пластин к поверхностному разрушению для применения при сертификационных, сравнительных и приемочных испытаниях.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ PDC-РЕЗЦОВ И ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ИХ РЕЖУЩИХ КРОМОК НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ДОЛОТА

Адекватность лабораторных испытаний на изнашивание обеспечивается только в том случае, если при эксплуатации на забое и в лабораторных условиях воспроизводится один и тот же механизм разрушения поликристаллической алмазной пластины. Проще всего это можно сделать с помощью исследований структуры изношенных участков PDC-резцов, отработавших определенный ресурс при бурении. На основе данных исследований необходимо выяснить кинетику повреждаемости режущей кромки и выявить характерные субзеренные и межзеренные структуры, указывающие на характер накопления повреждений внутри и на границах алмазных зерен, по которым можно будет оценить степень разрушения материала поликристаллической алмазной пластины, воспроизводимой в разрабатываемой методике входного контроля качества PDC-резцов.

Как было отмечено выше, общепринято различать две разновидности разрушения PDC-резцов: хрупкие сколы и нормальный износ [39]. Однако хрупкие сколы (в разных источниках называемые дроблением, выкрашиванием, сломом) с позиции классической механики возникают при превышении контактных давлений, действующих на рабочую кромку (или внутренних напряжений), предела прочности поликристаллического алмаза. Испытания рабочих кромок PDC-резцов на статическое сжатие до разрушения (скола) показало, что диапазон критических давлений для различных классов резцов составляет 4200...7500 МПа (исследования проводились Д.А. Копытиным в Самарском государственном техническом университете в рамках совместных работ). Этот интервал перекрывает диапазон твердости (4900...6800 МПа) весьма твердых пород, относящихся к X, XI и XII категории буримости. Однако характерные сколы возникают и при бурении меньших по твердости пород –

очень твердых VIII и IX категорий буримости (твердостью 2900...4900 МПа), твердых пород VI, VII категорий буримости (твердостью 1470...2900 МПа) и даже средних IV, V категорий буримости пород с твердостью на порядок более низкой, чем прочность самых слабых резцов. Учитывая, что твердость пород в разы превышает предел прочности, то даже при значительных коэффициентах динамичности, создающих кратную перегрузку резца, вследствие ударов, сопровождающих осевые, радиальные и крутильные колебания долота механические сколы рабочих кромок из-за превышения рабочих нагрузок невозможны. В противном случае имели бы место отказы долот в самом начале бурения, так как сломы в хрупких материалах возникают даже при мгновенных (длительностью 10 мс и менее) перегрузках, выше предела прочности. Тот факт, что отказ бурового долота формируется постепенно и хрупкие сколы формируются после определенного количества циклов ударных нагрузок, говорит в пользу того, что ведущим механизмом является усталость поликристаллической алмазной пластины, развивающаяся локально в зоне ее взаимодействия с породой.

Усталость имеет две характерные фазы: протяженную во времени латентную (скрытую) фазу и быструю фазу хрупкого разрушения. На протяжении латентной фазы видимые повреждения отсутствуют, но на уровне микроструктуры материала происходит постепенное накопление необратимых дефектов, приводящих к ослаблению материала, снижению порога сопротивляемости действующим внешним нагрузкам. Для выявления природы данных дефектов был выполнен фрактографический анализ поверхности PDC-резцов, подверженных повреждению при эксплуатации на забое.

Больше вопросов возникает при рассмотрении поверхностного разрушения резцов при бурении. Традиционно считается, что ведущим видом разрушения PDC-резцов при трении о породу является абразивное изнашивание [73, 74, 74, 76, 77, 78, 79, 80]. Это обосновано тем, что в соответствии с ГОСТ 27674-88 [81] абразивное изнашивание определяется, как «механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц». PDC резцы при бурении находятся в непрерывном контакте с

горной породой, обладающей достаточно высокими твердостью и абразивным действием. Вследствие этого даже твердые сплавы на основе карбида вольфрама не могут длительное время сопротивляться абразивному действию не только горных пород, но даже и буровому раствору (известно гидроабразивное воздействие потока бурового раствора на твердые сплавы [76, 77, 82, 83]). Но, еще со времен создания шкалы Мооса известно, что царапающее действие на тело может оказать другое тело, только если его твердость соизмерима или выше по значению, чем у царапаемого тела. Твердость поликристаллического алмаза составляет 10000 HV [84, 85], что более чем на порядок превышает твердость большинства горных пород. Поэтому, в случае контакта пары «поликристаллический алмаз – порода» царапающее и режущее действие оказывает именно алмазная вставка по отношению к материалу забоя. В этом легко убедиться: любые попытки поцарапать рабочую поверхность резца будут безуспешными. Поэтому вопрос об абразивном изнашивании PDC-резцов при эксплуатации нельзя считать однозначным и закрытым и поэтому он требует более глубоких исследований.

Еще одним видом эксплуатационного повреждения PDC-резцов, отмеченный авторами в работе [112], является образование термических трещин. Причиной такой формы разрушения считают сильный локальный нагрев рабочей части поликристаллической алмазной пластины при скольжении о забой. Однако образование термических трещин наблюдается на поздней стадии эксплуатации резцов, когда нормальный процесс резания постепенно сменяется процессом скольжения изношенной кромки по поверхности забоя, т.е. является следствием вышеназванного процесса поверхностного разрушения. Это делает актуальными вопросы изучения механизмов процесса поверхностного разрушения и поиска критериев перехода процесса взаимодействия PDC-резца с материалом забоя от резания к скольжению.

Чтобы глубже понять причины потери работоспособности PDC-резцов при бурении и обосновать способ входного контроля их качества, рассмотрим структуру поликристаллического алмазного слоя характерную для изделий после

наработки на забое. Это позволит выяснить вид поверхностного разрушения и физический механизм разрушения поликристаллической алмазной пластины, поскольку каждый вид изнашивания оставляет на поверхности трения свои характерные субструктуры поверхностного разрушения на фрактограммах.

2.1 Фрактографический анализ разрушенной поверхности PDC-резцов

Для исследования структуры изношенной поликристаллической алмазной пластины были изучены два PDC-резца различного диаметра (16 мм и 13 мм) после эксплуатации, имеющие характерные эксплуатационные повреждения: 1) разрушение режущей кромки; 2) гидроабразивное изнашивание подложки. Кроме того, каждый из резцов имел в нижней части нехарактерные для эксплуатации повреждения (сколы) твердосплавного основания, оставленные на образцах, по-видимому, в результате некачественного демонтажа с алмазного долота. На представленных резцах отсутствовала какая-либо маркировка и поэтому для дальнейших экспериментов резцы получили условную маркировку «большой резец» – резец диаметром 16 мм и «малый резец» – резец диаметром 13 мм. Характеристики наработки исследуемых резцов:

Долото - 220,7ммVS613DG1HU;

Объект – Тагульское месторождение, куст 106;

Фактическая проходка на долото: 1024 м.

Предположительно, данные резцы относятся к классу В, 2, (согласно таблице Е.1 «Общие технические условия СТО ИНТИ 1.100.55-2024»).

Один из резцов, больший по размерам, (рисунок 2.1 слева) был демонтирован вместе с фрагментом долота. Поэтому перед испытаниями резец был нагрет газовой горелкой до температуры плавления латунного припоя (приблизительно 700°C) и отделен от стальных фрагментов долота (рисунок 2.2).



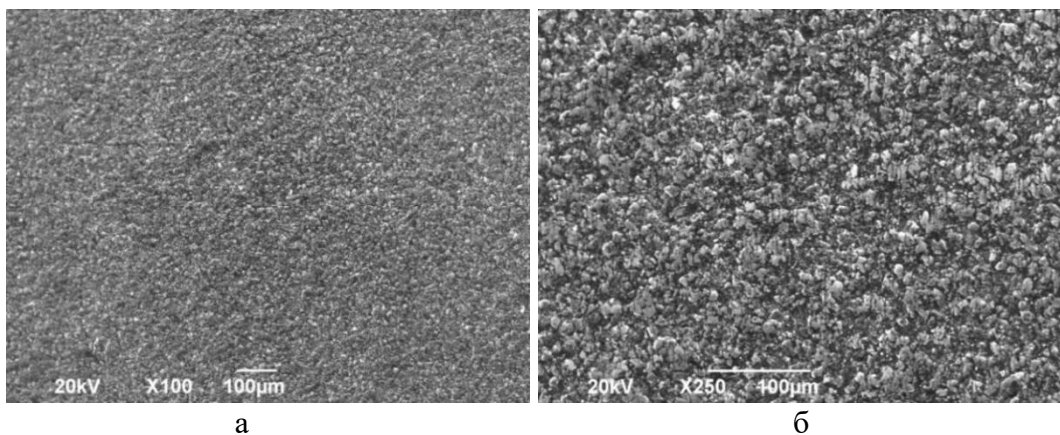
Рисунок 2.1 – Полученные образцы PDC-резцов



Рисунок 2.2 – Большой резец после подготовки к испытаниям

2.2 Исследование структуры PDC слоя большого резца

Микроструктура поверхности PDC слоя, полученная с разными увеличениями (от $\times 100$ до $\times 5000$) с помощью электронного микроскопа Jeol JSM – 6390A, приведена на рисунке 2.3. Результаты элементного состава материала, полученные методом рентгеноспектрального микроанализа, представлены в таблице 2.1.



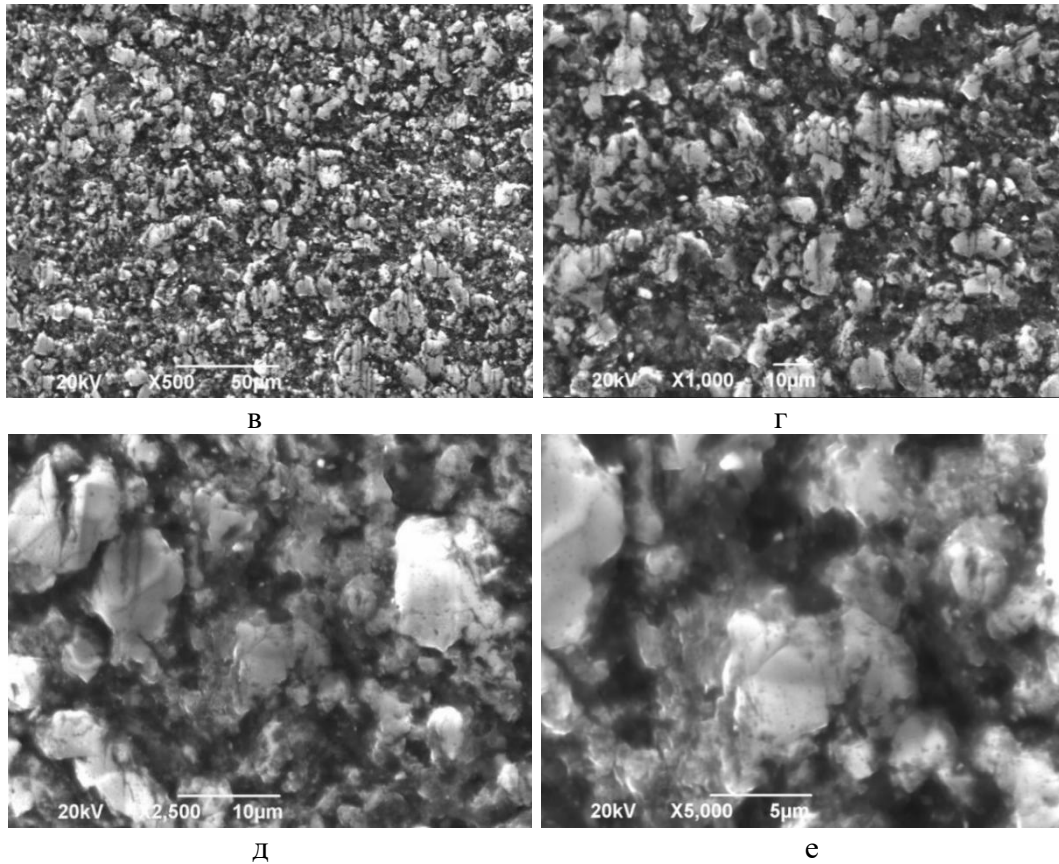


Рисунок 2.3 - Микроструктура изношенного участка PDC слоя большого резца с различными увеличениями:
а) $\times 100$; б) $\times 250$; в) $\times 500$; г) $\times 1000$; д) $\times 2500$; е) $\times 5000$

2.3 Исследование структуры PDC слоя малого резца

Аналогичные исследования микроструктуры поверхностного слоя PDC-пластины с разными увеличениями (от $\times 100$ до $\times 5000$) провели и на малом резце (рисунок 2.4). Результаты исследований показаны на рисунке 2.5. Результаты элементного состава материалов представлены в таблице 2.1.



Рисунок 2.4 – Внешний вид малого резца перед исследованиями

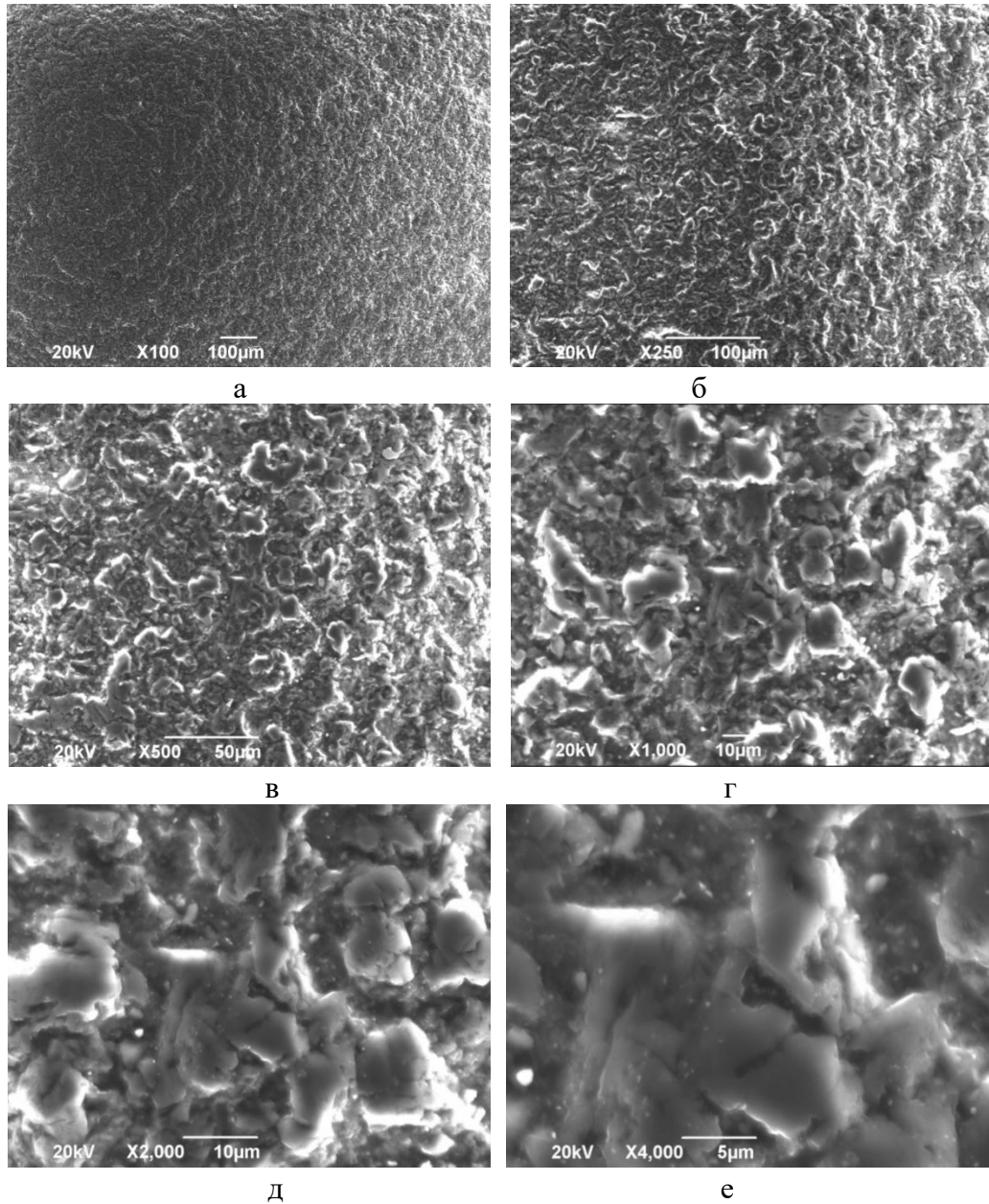


Рисунок 2.5 – Микроструктура изношенного участка PDC слоя большого резца с различными увеличениями:

а) $\times 100$; б) $\times 250$; в) $\times 500$; г) $\times 1000$; д) $\times 4000$

Таблица 2.1 – Элементный состав PDC слоя большого и малого резца

Элемент	Большой резец, Масс. %	Малый резец, Масс. %
C	93.43	93.87
O	2.58	2.72
Al	0.61	0.58
Si	1.21	1.28
Fe	0.73	0.78
Co	1.44	0.77

2.4 Исследование структуры PDC-резцов с гладким разрушением и хрупким выкрашиванием рабочей кромки

Резцы с различным характером разрушения поверхности PDC-пластины диаметрами 16 мм (гладкое разрушение и хрупкое выкрашивание) (рисунок 2.6) поступили на исследования с месторождения в Самарской области. На представленных резцах отсутствовала какая-либо маркировка. Резец с гладким разрушением (рисунок 2.6 а) имеет характерную блестящую поверхность нормального изнашивания. Резец с хрупким выкрашиванием материала пластины (рисунок 2.7 б) – неровную сколотую поверхность.

Предположительно, данные резцы относятся к классу В, 1, (согласно таблице Е.1 «Общие технические условия СТО ИНТИ 1.100.55-2024»).

Структура разрушенной части поверхности приведена на рисунке 2.8, элементный состав в таблице 2.2.

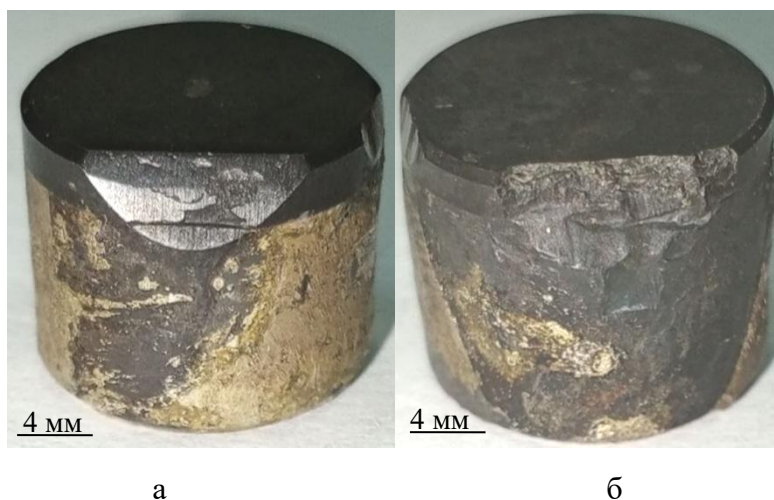


Рисунок 2.7 - Изношенные резцы с нормальным износом (а) и хрупким выкрашиванием (б) режущей кромки

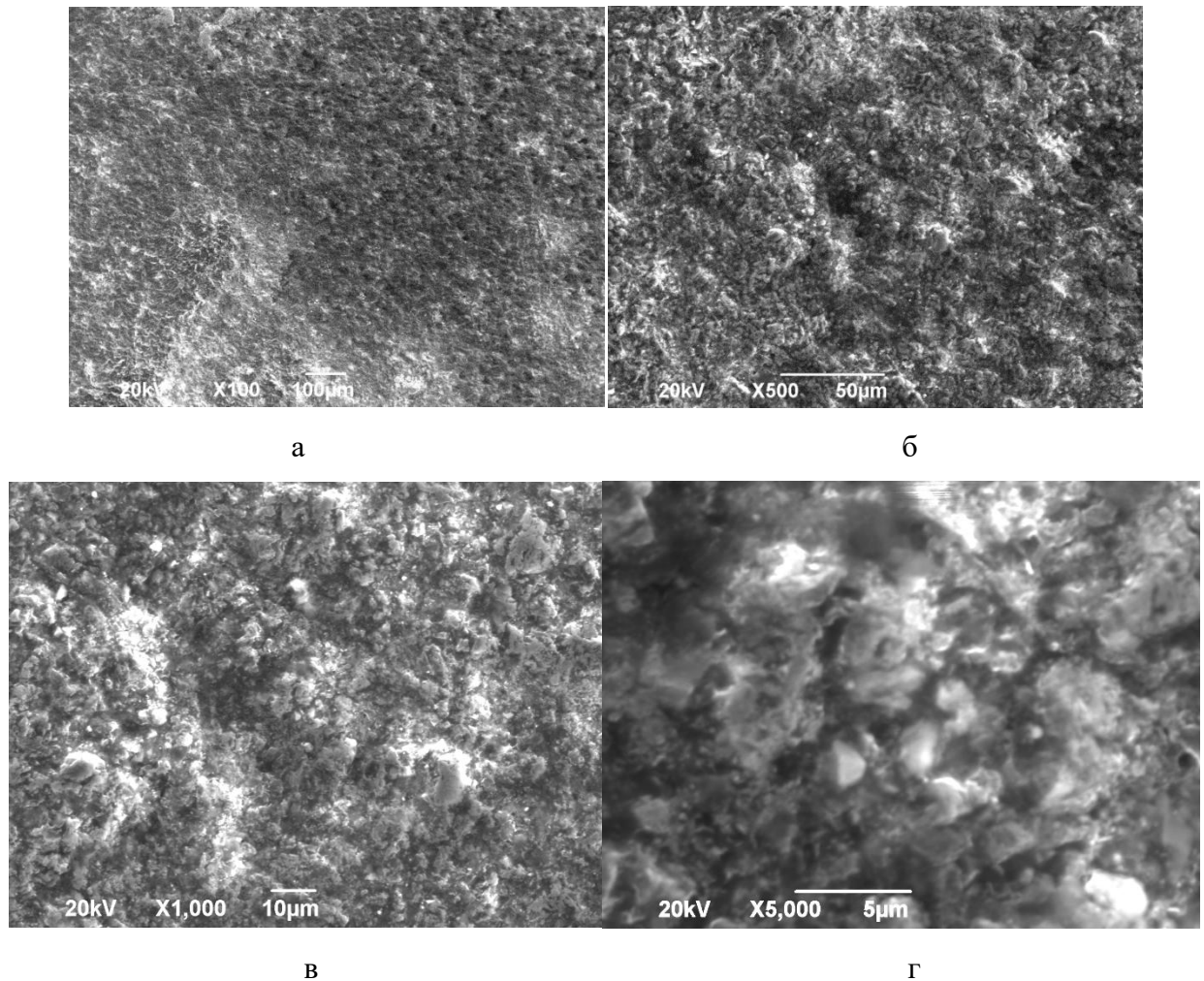


Рисунок 2.8 – Микроструктура изношенного участка PDC слоя с различными увеличениями: а) $\times 100$; б) $\times 500$; в) $\times 1000$; г) $\times 5000$

Структура изношенной части поверхности правого резца с хрупким разрушением режущей кромки приведена на рисунке 2.9, элементный состав в таблице 2.4. Нарботанный Копытиным Д.А. материал по изучению хрупких изломов поликристаллических алмазных пластин, полученных как при циклических ударных нагрузках, так и при раскалывании кромки зубка однократным нагружением, позволил установить, что на поверхности разрушения присутствует характерный ступенчатый (слоистый) излом. Это позволит точнее идентифицировать отличия между механизмами разрушения при нормальном изнашивании и хрупком разрушении.

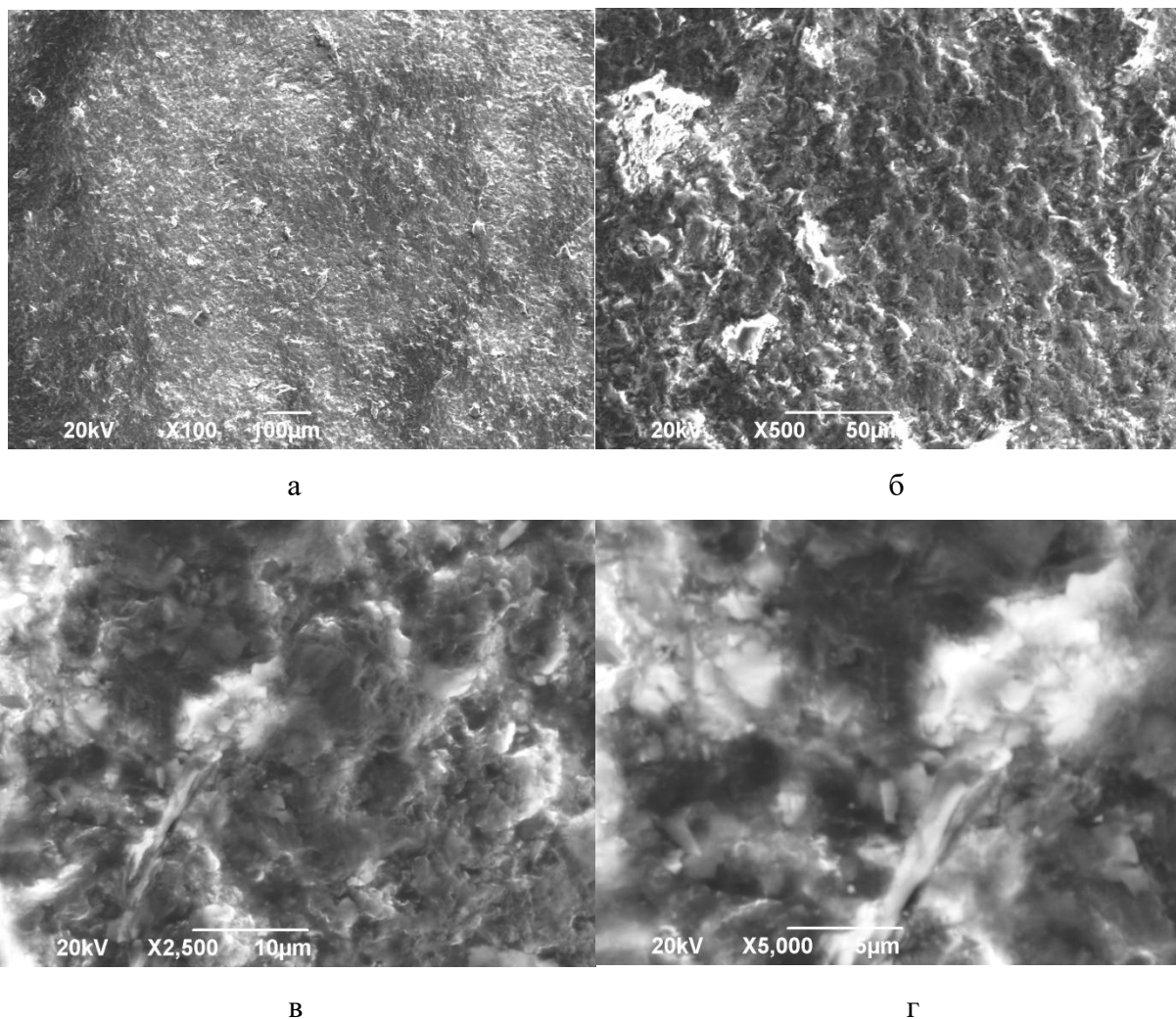


Рисунок 2.9 – Микроструктура изношенного участка PDC слоя реза с хрупким изломом режущей части с различными увеличениями:
а) $\times 100$; б) $\times 250$; в) $\times 500$; г) $\times 1000$; д) $\times 4000$

Таблица 2.2 – Элементный состав участка PDC слоя с хрупким изломом режущей кромки реза

Элемент	С гладким разрушением, Масс. %	С хрупким изломом, Масс. %
C	82.86	79.72
O	4.14	6.53
Mg	1.06	1.08
Al	1.97	2.92
Si	0.70	4.50
Ca	1,49	1.68
Fe	-	3.57
K	2,76	-
Co	0,76	-
Sn	4,26	-

2.5 Анализ полученных результатов

Перед анализом полученных фрактограмм рассмотрим, что нам известно о разрушении алмазов, так как каждое зерно поликристаллической алмазной пластины представляет собой, как правило, монокристалл размерами около 20...30 мкм. Фундаментальный вклад в изучение изломов на алмазах внесли Кухаренко А.А., Рамасешан С., Калинин В.Д. и др. [87-90]. Монокристаллы имеют выраженную анизотропию механических свойств. С одной стороны, в этом заложен ресурс повышения износостойкости PDC-резцов, поскольку направление взаимодействия с породой известно и его можно задавать при сборке долота, однако, вследствие хаотичного расположения алмазных зерен во время спекания, анизотропия может и ускорить разрушение в случае «невыгодного» расположения зерна. Это «цена», которую приходится платить, получая изотропные свойства поликристалла в целом.

Элементарная решетка алмаза имеет тетраэдрическую форму и укладывается в кубическую гранцентрированную решетку с 4-мя дополнительными атомами углерода (расположенными в центрах несмежных октаэдров) [91]. При этом самое энергетически выгодное место появления трещин в монокристаллическом алмазе задают кристаллографические плоскости $\{111\}$ (энергия раскалывания 11330 эрг/см^2 по С. Рамасешану [87]), имеющие более плотную упаковку химически связанных атомов углерода (рисунок 2.10). Но есть и другие плоскости, по которым алмаз может иметь сколы $\{332\}$, $\{221\}$, $\{331\}$, $\{110\}$, $\{322\}$ и др. Благодаря ювелирным свойствам алмаза они хорошо изучены и используются при обработке ювелирных камней. Для сравнения, если удары породы будут направлены вдоль плоскостей $\{100\}$ энергия раскалывания возрастает до 19630 эрг/см^2 [87]. В случае изотропного поликристалла энергетически выгодные плоскости образования трещин будут определяться направлением резания и пространственным расположением зерен. Трещина пойдет по плоскости, в которой отношение силы, равной произведению силы реакции породы на косинус угла между направлением резания и данной плоскостью, на площадь, которую охватывает данная плоскость в зерне, превысит

критическое напряжение скалывания.

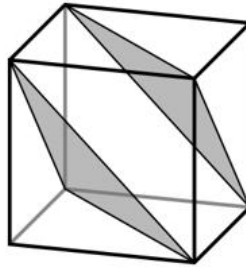


Рисунок 2.10 – Плоскости $\{111\}$ наиболее легкого раскалывания алмазных зерен

Учитывая, что алмазные зерна, находящиеся в контакте с породой и получающие динамические воздействия (микро- и макроудары) в одном направлении от твердых частиц породы будут трескаться по параллельным плоскостям, пока данная мода не будет исчерпана, далее могут включиться расколы фрагментов по другим плоскостям. Первыми разрушению подвергнутся те зерна, для которых направление резания совпадет с расположением плоскостей $\{111\}$. В целом это можно рассматривать как диссипативный процесс, ведущий к самоорганизации новых, более мелких и устойчивых диссипативных структур. В поликристалле трещина, зародившаяся в одном алмазном зерне, не может свободно перейти в соседний кристалл, если плоскости упаковки атомов последнего сильно отклонены (разориентированы) относительно плоскостей скольжения в первом кристалле. Поэтому поликристаллический алмаз более устойчив к динамическим нагрузкам, чем монокристалл. Этим объясняется и то, что треснувшее зерно может длительное время сохранять свое положение, не отделяясь с поверхности, удерживаясь в поликристалле карбидными связями с нижними зернами.

Алмазы имеют более 15 возможных плоскостей скалывания, что приводит к большому многообразию возможных характерных форм (паттернов или «скульптур» по А.А. Кухаренко) на поверхности разрушения [88]: раковины, каналы, треугольные углубления, штриховки, зональности и пр., образовавшихся вследствие различных процессов (коррозии, диффузии и др.), активируемых

геологическими условиями. При изнашивании материалов также существуют особые паттерны. Так, возвращаясь к вопросу о ведущем виде изнашивания, мы ожидаем увидеть на поверхности: при абразивном изнашивании – длинные равномерно распределенные параллельные борозды (следы царапания материала твердыми частицами), вытянутые вдоль направления трения.

Следует отметить, что вдоль направлений $\{111\}$ возможны также диффузионные процессы, которые могут изменить химический состав кристалла и повлиять на его свойства. Поэтому анализ химического состава изношенной поликристаллической пластины не менее важен, чем структура его поверхности.

Исследования структуры и элементного состава рабочих кромок отработавших на забое изделий показали следующее.

В процессе эксплуатации алмазный слой PDC-резцов претерпевает изменение химического состава. Содержание кобальта в массовых долях снижается с 1,5...3% (характерных для новых резцов) до 0,7...1,4% (на изношенных). Уменьшение количества кобальта положительно сказывается на температурной стойкости поликристаллического алмаза и, как было отмечено выше, иногда специально реализуется на резцах путем их глубокого выщелачивания. После растворения в смеси кислот содержание кобальта уменьшается до 0,6...0,8 %, т.е. практически до тех же показателей, что и при эксплуатации на забое. Это свидетельствует о том, что удорожание технологии производства PDC-резцов за счет их выщелачивания не вполне обосновано, поскольку избирательное изнашивание кобальта происходит самопроизвольно в процессе бурения. Кроме того было отмечено, что поверхности режущих кромок, вырабатывающие ресурс в режиме нормального изнашивания (имеют внешне гладкую с темным блеском поверхность) всегда содержат некоторое остаточное количество кобальта, а поверхности трения, образованные макро- или микросколами практически его не содержат. Кобальт используется в качестве металла-связки при спекании алмазных частиц и проведенные исследования указывают на важность его присутствия для нормальной эксплуатации резцов. В работе [53] прямо указывается, что удаление кобальта снижает прочность и

стойкость резцов почти на 40%. Это объясняется появлением пустот, играющих роль концентраторов напряжений. Кроме того можно видеть, что в химическом составе поверхности трения практически полностью отсутствует вольфрам, который всегда имеется в начальном составе поликристаллических алмазов (около 1,5%).

В результате эксплуатации на забое в химическом составе PDC-пластины добавились новые элементы – железо, кремний и алюминий. Можно предположить, что данные элементы диффундировали в поверхность резца из рабочей среды (разрушаемой породы и бурового раствора). Влияние данных элементов на кинетику разрушения алмазной пластины пока не изучено.

В процессе исследований структуры поверхностного слоя и разрушенных режущих кромок поликристаллических алмазных пластин не были замечены следы абразивного изнашивания (рисунки 2.3, 2.5, 2.8, 2.9). Это позволяет констатировать тот факт, что алмазные пластины не подвержены при эксплуатации царапающему и деформирующему действию твердых частиц и твердых выступов и термин «абразивное изнашивание» актуален только при описании процессов разрушения твердосплавной подложки в результате ее взаимодействия с потоком бурового раствора содержащего абразивные частицы (гидроэрозионное изнашивание), либо при трении о породу в случае раскалывания рабочей кромки алмазной пластины, которая (в начальном состоянии) экранирует подложку от непосредственного контакта с забоем. Последнее хорошо видно на резцах, в которых после отработки профиль изношенной подложки повторяет профиль скола на алмазной пластине. Иногда на ровной изношенной поверхности алмаза видны каверны (полости) со следами хрупкого разрушения, что свидетельствует о том, что процесс изнашивания постепенно выравнивает поверхности хрупкого излома.

Анализ структуры материала (рисунок 2.11) показал, что в процессе бурения происходит дробление алмазных частиц до фрагментов величиной порядка 5 мкм и меньше. На поверхности алмазных кристаллов можно видеть: растущие трещины в виде параллельных полос, не пересекающих кристалл

полностью; трещины, разрушившие алмазную частицу; трещины по границам зерен. При этом, важно, что после растрескивания фрагменты не отделяются с поверхности, а удерживаются на месте. Отделение фрагментов кристаллов начинается по кромкам трещин, что позволяет по ширине трещин определять, какие из них возникли раньше, а какие позже. Например, трещины между алмазными зёрнами являются более широкими, чем внутри зерен, что говорит о том, что первыми разрушаются менее прочные межзеренные связи, затем процесс разрушения переходит внутрь зерен, раскалывая их на части параллельными трещинами, далее трещины начинают развиваться внутри фрагментов по другим плоскостям. Каждая новая трещина является стоком для накапливающихся дислокаций и обеспечивает релаксацию внутренних напряжений. Такой механизм нормального изнашивания резцов полностью соответствует описанию усталостного механизма разрушения – постепенное накопление повреждений в виде межзеренных и внутризеренных трещин с последующим отделением фрагментов зерен и «вскрытием» нижележащих слоев.

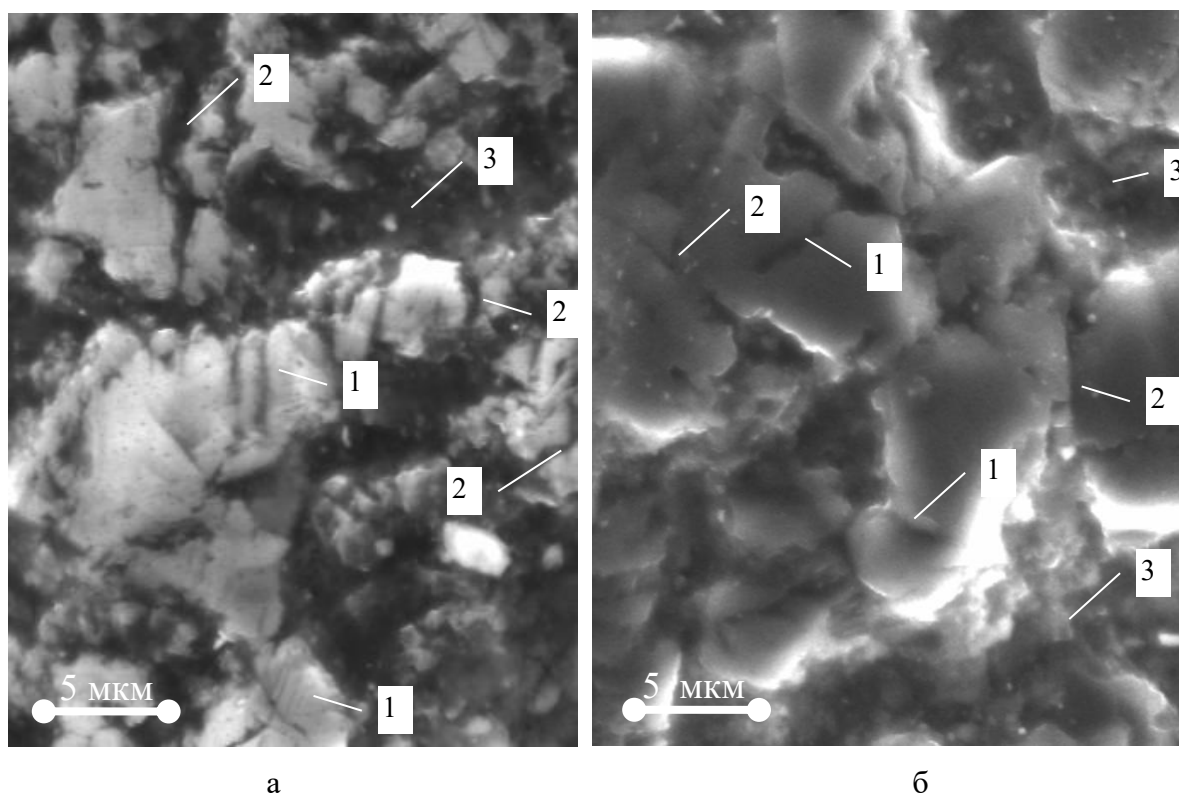


Рисунок 2.11 – Дробление алмазных зерен при эксплуатации на большом резце (а) и малом резце (б): 1 – растущие трещины в зерне, 2 – трещины, расколовшие зерно; 3 – трещина между зёрнами

Структуры поверхности изношенных резцов после процесса бурения приведены на рисунках 2.12-2.15. На рисунках представлены характерные субструктуры, указывающие на характер накопления повреждений внутри алмазных зерен поликристаллической алмазной пластины. Исследования позволили выявить несколько характерных субструктур, формирующихся при изнашивании режущих кромок резцов: полосчатая (рисунок 2.12), каменистая (рисунок 2.13), ступенчатая (рисунок 2.14 (а)), серповидная (рисунок 2.14 (б)), ямочная (рисунок 2.14 (в)), канавочная. Нередко можно на одном резце можно наблюдать субструктуры, характерные одновременно и для процесса изнашивания и для процесса хрупкого разрушения. Такая структура позволяет установить, что начальное разрушение режущей алмазной кромки произошло за счет хрупкого скола с последующим постепенным истиранием неровностей.

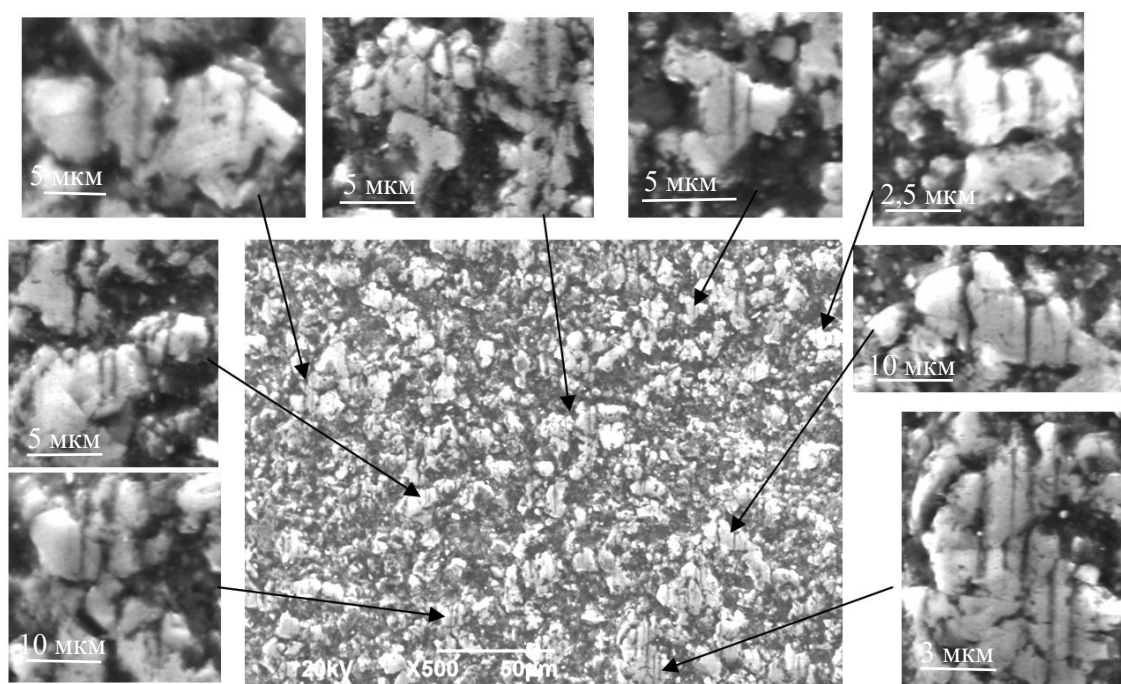


Рисунок 2.12 – Внешний вид поверхности трения PDC-резца с полосчатой субструктурой

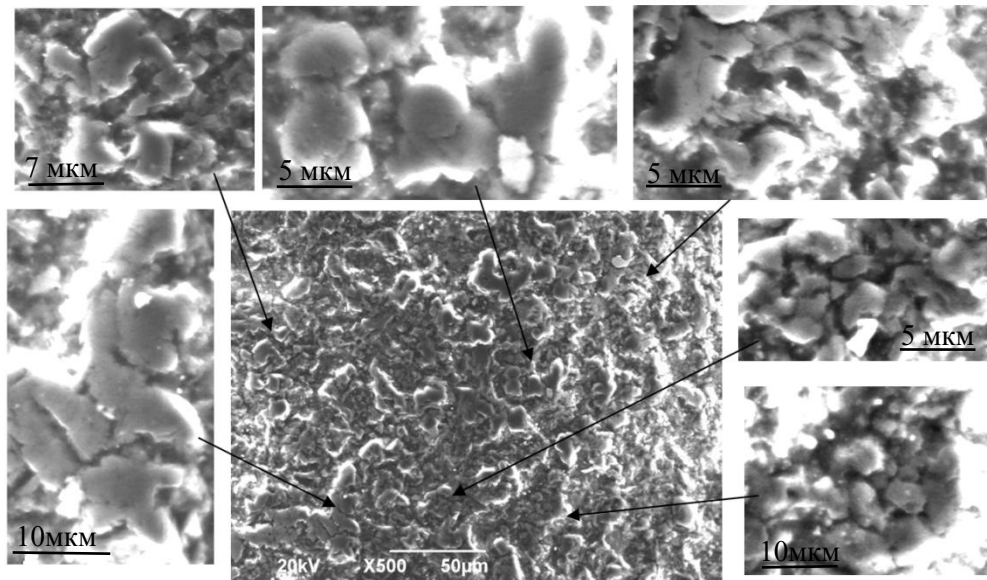


Рисунок 2.13 – Внешний вид поверхности трения PDC-резца с каменной субструктурой

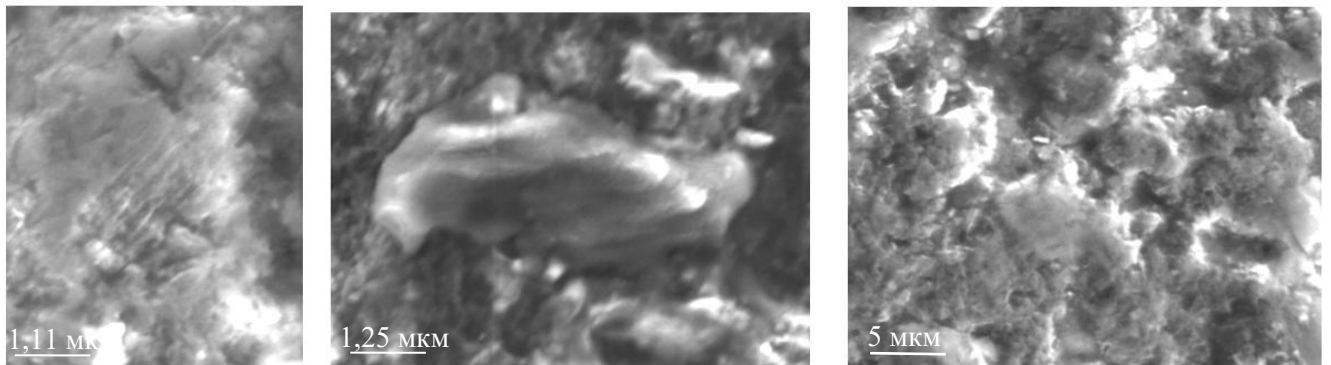


Рисунок 2.14 – Внешний вид других субструктур поверхности трения PDC-резцов: а) ступенчатая; б) серповидная; в) ямочная

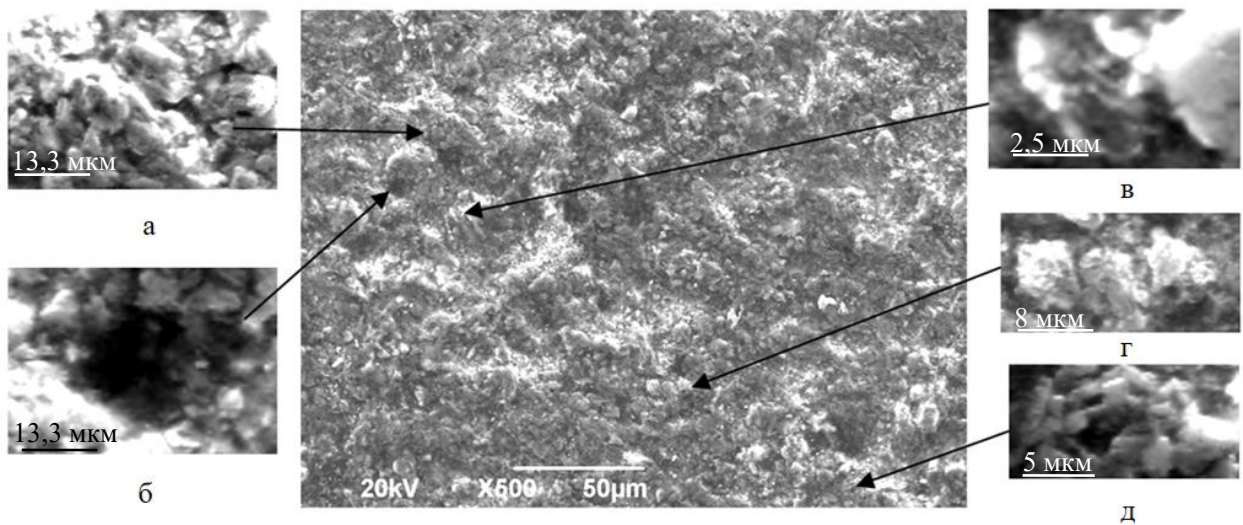


Рисунок 2.15 – Внешний вид поверхности трения PDC-резца с гибридной структурой: а) полосчатая; б) каменная; в) ямочная; г) ступенчатая; д) серповидная

Как было отмечено выше, наиболее легкое раскалывание алмазных зерен идет по плоскостям $\{111\}$. Этим можно объяснить появление в некоторых алмазных зернах системы параллельных трещин, образующих полосчатый, серповидный или ступенчатый рисунок на фрактограммах. Это происходит, когда вектор сил резания при бурении совпадает (или близок) этой плоскости в алмазном зерне. Если такого совпадения нет, то алмазные зерна раскалываются по разным плоскостям, образуя каменистый излом с фрагментами порядка нескольких микрометров. С краев трещин начинают отделяться частицы, это визуально её расширяет. Поэтому по ширине трещин можно определить, какие возникли раньше, а какие позже. В местах слияния трещин образуются ямки. Наибольшее число ямок образуется между зернами, которые, сливаясь образуют канавочную субструктуру.

2.6 Выводы по 2-й главе

1. Проведенные исследования позволили установить физический механизм поверхностного разрушения поликристаллического алмаза при взаимодействии с породой, который заключается в постепенном накоплении повреждений, вначале по границам зерен, затем внутри зерен и далее в их фрагментах. Повреждения в виде трещин располагаются вдоль плоскостей с более плотной упаковкой атомов и часто раскалывают зерно по параллельным плоскостям. Такой механизм разрушения соответствует усталостному разрушению. Следовательно, при разработке методики лабораторных испытаний резцов необходимо воспроизводить данный вид изнашивания.

2. Изучены субструктуры, характерные для данного вида поверхностного разрушения поликристаллических алмазных пластин при эксплуатации. По данным характерным субструктурам можно сверять соответствие характера разрушения материала при лабораторном изнашивании с тем, который имеет место быть при эксплуатации. Усталостному характеру разрушения также способствуют циклические ударные нагрузки, испытываемые резцами при разрушении пород.

3. Установлен усталостный механизм накопления повреждений

поликристаллических алмазных пластин при поверхностном разрушении за счет накопления дефектов (трещин) в алмазных зернах. Впервые поверхностное разрушение алмазных материалов идентифицировано, как контактная усталость.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОТКАЗА PDC ДОЛОТ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Разработка специализированного оборудования и методов оценки твердости материалов вдавливанием и царапанием поликристаллической алмазной пластиной

Поскольку величина твердости материала зависит от условий проведения оценки и формы внедряемого в материал индентора, поэтому более строгий подход к оценке критерия работоспособности алмазных долот требует проведения экспериментальных исследований, в которых в качестве индентора должен использоваться натуральный резец, закрепленный в оправке под соответствующим углом к поверхности испытываемой породы (рисунок 3.1). В случае оценки твердости методом вдавливания к индентору необходимо приложить только осевую нагрузку F_n , а в случае царапания дополнительно создать усилие резания F_τ для сообщения резцу тангенциального перемещения режущей кромкой вперед.

Использование в качестве индентора пластины PDC, монолитно спеченной с твердосплавной подложкой, имеет множество преимуществ помимо того, что она имитирует контакт резца с забоем. Такой индентор доступнее, проще и дешевле стандартной пирамиды Виккерса; отсутствие острой вершины и высокая износостойкость придают ему повышенную надежность. А в случае поверхностного разрушения рабочей кромки можно восстановить работоспособность индентора небольшим поворотом вокруг его оси, подставляя под анализируемый материал новый, неизношенный участок фаски, что обеспечивает долговечность индентора. Кроме того, для оценки твердости можно использовать и отработавшие в эксплуатации резцы с сохранившимися участками режущей поверхности.

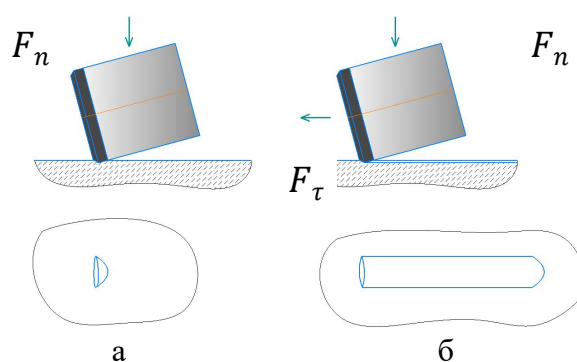


Рисунок 3.1 – Схема уточненной оценки твердости материалов методом вдавливания поликристаллической алмазной пластины (а) и методом царапания поверхности PDC резцом (б)

За величину твердости примем, как и в классических методах, отношение нормальной нагрузки на индентор к площади полученного отпечатка. Нормальная нагрузка задается набором грузов и ее точная оценка не представляет проблемы. Сложность заключается в определении площади, на которую приходится эта нагрузка. В отличие от стандартных инденторов правильной формы (шар, конус, пирамида) контакт поликристаллической алмазной пластины с образцом представляет собой сложную пространственную фигуру. Так, при вдавливании резца в породу эта площадь в общем случае формируется внедренным сегментом передней поверхности резца, частью конической поверхности фаски и частью боковой цилиндрической поверхности резца. При царапании породы режущей кромкой PDC-резца эта площадь перераспределяется вперед на режущие сегменты конической фаски и передней поверхностью алмазной пластины. Такое перераспределение способствует дополнительному заглублению резца в породу, поэтому при одинаковой силе F_n ширина отпечатка при вдавливании будет меньше ширины оставляемой индентором борозды при царапании (резании). Аналогичную картину можно видеть при оценке микротвердости по Виккерсу методом вдавливания и царапания поверхности испытуемого материала четырехгранной алмазной пирамидой [99,100].

Рассмотрим подробнее метод оценки твердости горных пород царапанием. После нагружения резца производят его перемещение относительно породы режущей плоскостью вперед или перемещение образца породы относительно

неподвижного в тангенциальном направлении резца в направлении – навстречу рабочей кромке PDC-резца. Этот метод позволяет не только адекватно воспроизвести в лабораторных условиях элементарный акт резания горной породы, но и оценить по ширине борозды изменение твердости на различных участках шлифа породы, если материал имеет сильную неоднородность.

Следует отметить, что физический механизм резания горных пород существенно отличается от резания металлических материалов. При резании металлов ведущая роль в образовании стружки отводится пластическим деформациям, в результате которой твердость наклепанной стружки превышает основной материал до 1,5 раз. Механизм образования металлической стружки складывается из трех этапов [101, 102]. Вначале у вершины режущей кромки материал упруго-пластически сминается и упрочняется, затем образовавшийся наклепанный фрагмент смещается режущей кромкой по плоскости сдвига в направлении резания, в заключение стружка деформируется, скользит по режущей кромке и одновременно вновь происходит смятие материала поверхностного слоя при вдавливании в него резца.

При резании горной породы вначале происходит поверхностное вдавливание резца в породу (аналогично тому, как вдавливается индентор в материал при определении твердости) за счет его тонкого выкрашивания. Вдавливание происходит до достижения контактного давления, равного по величине твердости материала. При этом порода довольно точно приобретает форму вдавленной поверхности индентора. По мере увеличения давления на резец увеличивается площадь соприкосновения вершины резца с породой и растут объемные напряжения в породе на некотором расстоянии перед режущей кромкой. При достижении этих напряжений предела прочности происходит скалывание фрагмента породы перед резцом. Далее разрушенные частицы породы удаляются, резец снова врезается в образовавшуюся поверхность и процесс повторяется вновь. Поскольку контактные напряжения вдавливания существенно превышают напряжения скалывания, то резание породы неизбежно связано с заметными колебаниями крутящего момента. Фаза врезания дает рост крутящего момент,

фаза скалывания – спад крутящего момента при бурении. Таким образом, резание породы всегда сопряжено с крутильными (торсионными колебаниями).

Проблему оценки площади контакта резца с породой и ширины борозды при царапании решили графическим методом. Для этого в программной среде Компас была разработана 3D модель резца диаметром 13,5 мм с толщиной алмазной пластины 2 мм с фаской 0,6 мм. Затем методом последовательного отсечения от резца фрагментов режущих кромок, соответствующих различным глубинам их внедрения в породу определяли программными средствами площадь режущей части поверхности фаски и длину линии контакта резца с поверхностью, определяющей ширину борозды (рисунок 3.2).

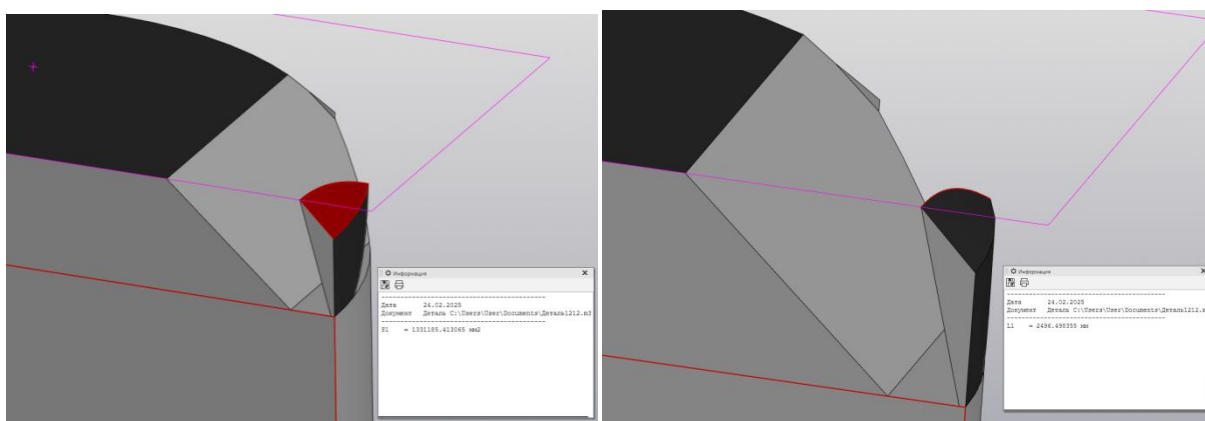


Рисунок 3.2 – Оценка площади контакта резца с породой и ширины царапины

Результаты расчетов приведены в таблице 3.1 и на диаграмме 3.3.

Чтобы отличать твердость, полученную с использованием поликристаллической алмазной пластины, обозначим ее как HPDC.

Таблица 3.1 – Расчет твердости пород при царапании поликристаллической алмазной пластиной при осевой нагрузке 20Н

Глубина внедрения h, мкм	Ширина борозды w, мкм	Площадь контакта S, мм ²	Твердость HPDC, МПа
1	236,457	0,000274619	72828
2	334,422	0,000823919	24274
3	409,608	0,001491363	13410
4	473,005	0,002346191	8524
5	528,8696	0,003468563	5766
6	579,3846	0,004342119	4606

Продолжение таблицы 3.1

7	625,8467	0,005768488	3467
8	669,101	0,007057501	2833
9	709,73	0,008259197	2421
10	748,173	0,009381566	2131
11	784,74	0,010911059	183

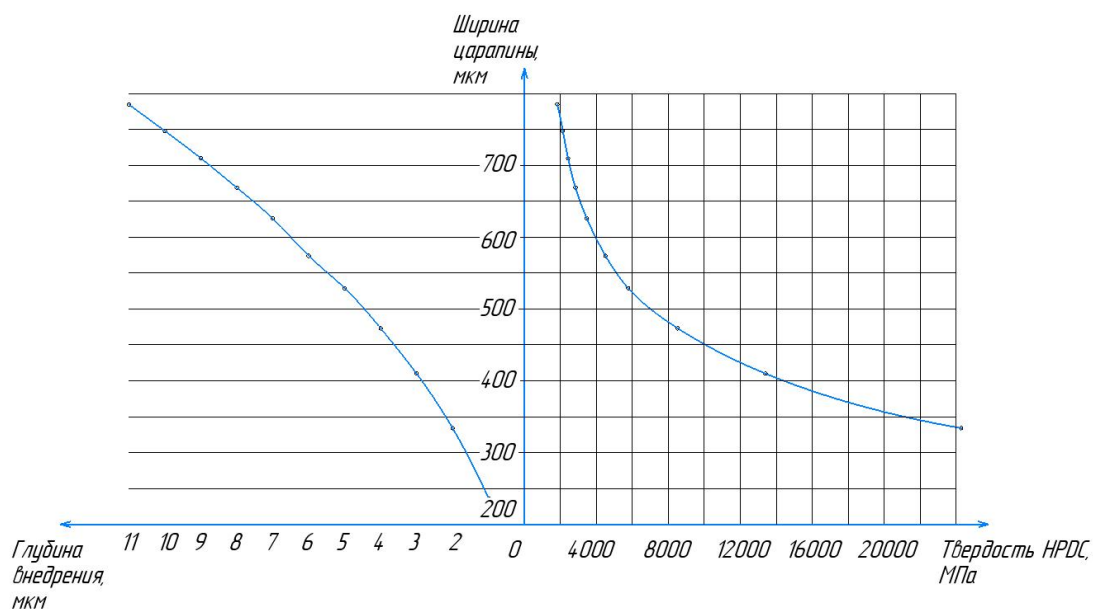
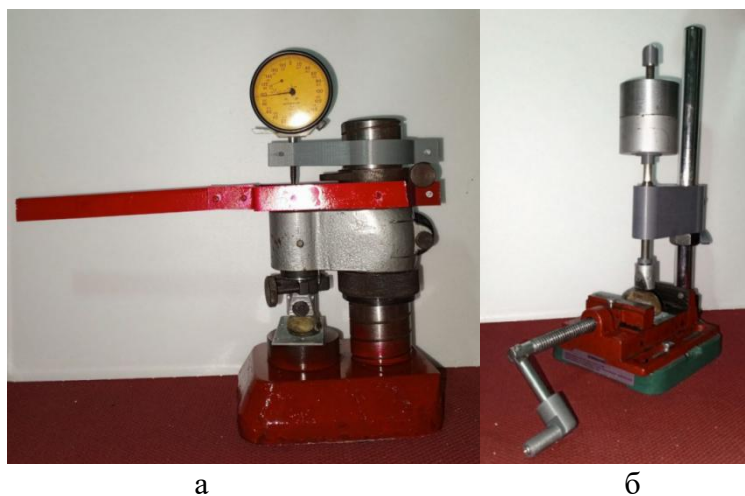


Рисунок 3.3 – Диаграмма, перевода ширины царапин в глубину резания и единицы твердости HPDC

Для экспериментальной оценки твердости методом вдавливания и царапания породы поликристаллической алмазной пластиной совместно с А.А. Акопян были разработаны и изготовлены два твердомера (рисунок 3.4).



а

б

Рисунок 3.4 – Твердомеры для оценки твердости материалов методом вдавливания поликристаллической алмазной пластины (а) и царапанием поверхности PDC резцом (б)

Твердомер для оценки твердости методом вдавливания алмазной пластины (рисунок 3.4 а) состоит из массивного основания с запрессованными в него вертикальной стойкой и столиком. На столик устанавливают образец материала с подготовленным шлифом. На стойке закреплены: кронштейн для микрометрического индикатора часового типа с ценой деления 1 мкм; рычажная втулка с шарниром для крепления рычага; кронштейн, играющий роль направляющей для штока. На стойке имеется винтовая канавка и регулировочная гайка для установки требуемой высоты установки кронштейна со штоком. В центре верхнего торца штока соприкасается с измерительным щупом микрометра. К нижней части штока прикреплена оправка с PDC резцом. Оправка фиксирует резец под углом 15° к горизонтальной поверхности шлифа.

Твердомер для оценки твердости методом царапания материала поликристаллической алмазной пластиной (рисунок 3.4 б) состоит из основания, на котором закреплены тиски с модифицированной рукояткой для удобства ее непрерывного вращения. На основании зафиксирована вертикальная стойка, на которой находится кронштейн, имеющий возможность перемещаться вдоль стойки и фиксироваться на ней винтом в требуемом положении. На кронштейне имеется цилиндрическая направляющая, в которую вставлен шток, имеющий возможность свободно перемещаться по вертикали вдоль направляющей. Верхняя часть штока содержит упор для установки грузов и рукоятку для приподнимания штока. К нижней части штока прикреплена оправка с отверстием для фиксации PDC-резца под углом 15° к горизонту. Кронштейн со штоком можно сделать поворотным и дополнительно к нему установить кронштейн с USB микроскопом. Тогда появится возможность обмера ширины царапины или длины лунки на одном приборе.

Метод оценки твердости выполняется следующим образом.

Образец горной породы приклеивают к подложке из ферромагнитного материала (рисунок 3.5 а, б) и, зафиксировав подложку на магнитном столе, производят шлифование поверхности образца породы. Можно для изготовления шлифа использовать алмазный диск (рисунок 3.5 в).

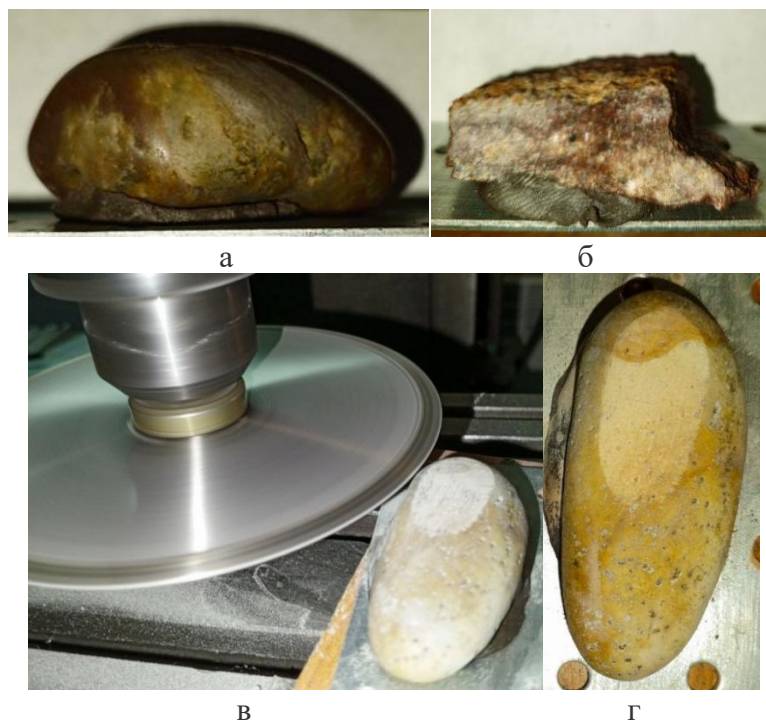
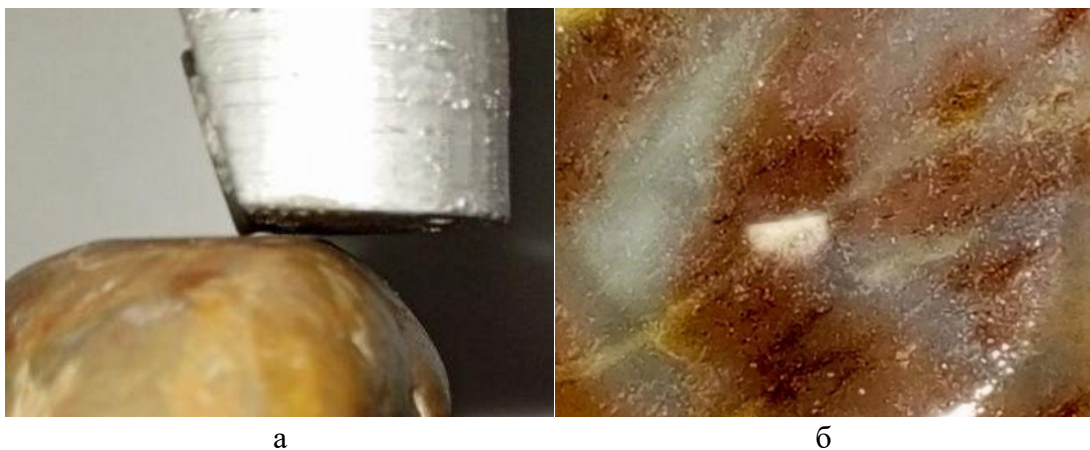


Рисунок 3.5 – Метод оценки твердости горных пород: приклеивание к основанию образца кварцита (а), лимонита (б); изготовление шлифа алмазным диском (в); готовый шлиф на образце кремня (г)

PDC-резец диаметром 13,3 мм устанавливают в специальную оправку (рисунок 3.6) в нижней части штока, удерживающую резец под заданным углом к породе 15° . Кронштейн со штоком опускают на 3...5 мм ниже уровня, соответствующего касанию нижней кромки поликристаллической алмазной пластины со шлифованной поверхностью породы. Это обеспечивает возможность внедрения резца в породу после приложения осевой нагрузки. Показания микрометрического индикатора устанавливают на «ноль». Затем с помощью рычага производят нагружение резца нормальной нагрузкой 300 Н (нагрузка выбирается исходя из условия недопущения объемного раскалывания образца). Фиксируют глубину внедрения резца в породу. Снимают нагрузку на резец. Процедуру повторяют до достижения требуемой точности результата. Твердость породы определяют в МПа по диаграмме (рисунок 3.3).



а б
Рисунок 3.6 – Контакт кромки резца со шлифом (а), внешний вид образующейся лунки на кварците (б)

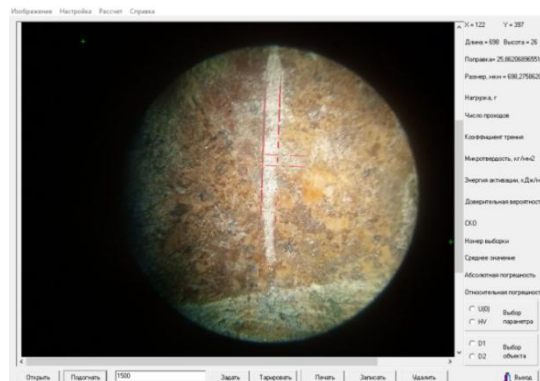
Для апробации нового метода оценки твердости царапанием провели оценку твердости образцов, относящихся к категории крепких пород – гранита и кварцитов (6-7 единиц по Моосу), бурение которых вызывает быстрый износ резцов. Цель данных исследований – подобрать модельный материал, позволяющий при испытаниях на стойкость к поверхностному разрушению создать имитацию бурения крепких пород для возможности ускоренного получения результатов лабораторных испытаний резцов. Результаты испытаний представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Оценка твердости крепких пород методом царапания PDC-пластиной

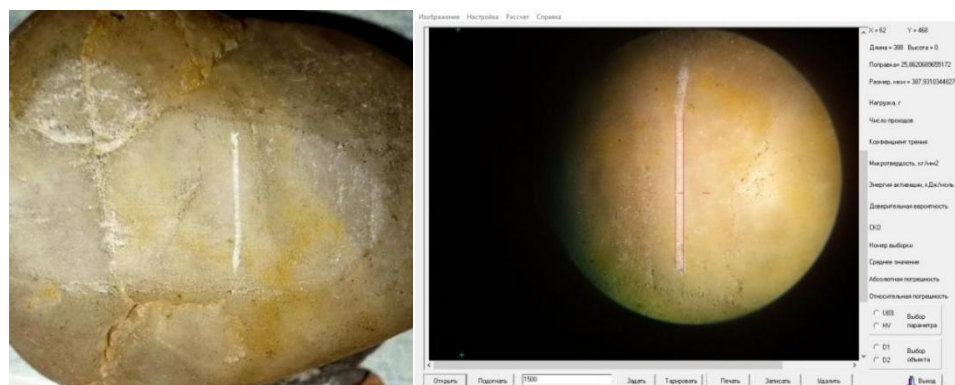
Образец	Ширина царапины, мкм	Глубина врезания, мкм	Твердость HPDC, МПа
Гранит	493...698	4,3...8,7	2600...7500
Кварцит 1	388	2,7	15600
Кварцит 2	440	3,4	10900



а



б



В

Г



Д

Е

Рисунок 3.7 – Общий вид образцов горной породы со шлифом (слева) и результаты измерения ширины борозды (справа): а, б – гранит; в, г – кварцит; д, е. - лимонит

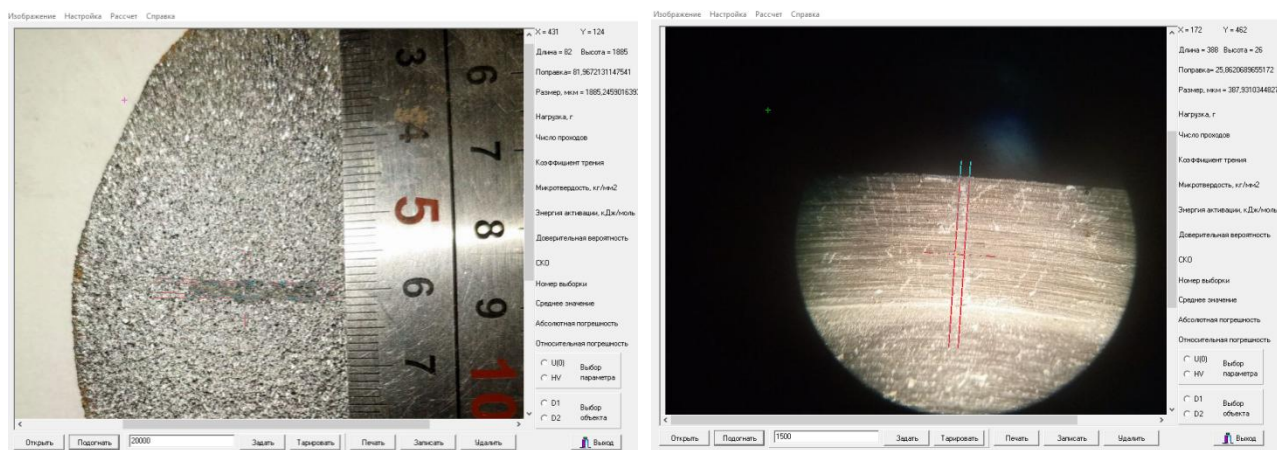
Как видно из таблицы 3.2 метод оценки твердости горных пород царапанием PDC резцом дает удовлетворительные результаты в сравнении с литературными данными для этих пород по показателю твердости.

В качестве модельных материалов для испытания резцов на стойкость к изнашиванию нами были рассмотрены: 1) абразивный круг с зернами карбида кремния зеленого и 2) алмазосодержащий слой алмазного отрезного диска (рисунок 3.8). Первый материал уже показал свою работоспособность в работах предшественников [23, 56]. Второй материал рассматривался в качестве возможной альтернативы вследствие большей доступности и относительно низкой стоимости по сравнению со шлифовальными кругами (в том числе алмазными и эльборовыми), а также высоких абразивных свойств. При этом стальная связка обладает достаточной прочностью, чтобы хорошо удерживать зерна и пластичностью, чтобы исключить хрупкое разрушение материала.

Результаты испытаний представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Оценка твердости модельных материалов методом царапания PDC-пластиной

Образец	Ширина царапины, мкм	Глубина врезания, мкм	Твердость HPDC, МПа
Шлифовальный круг с зернами карбида кремния (64С)	1885	60	340
Алмазный отрезной диск (НС 320)	387	2,67	15852



а б
Рисунок 3.8 – Контакт кромки резца со шлифом (а), внешний вид образующейся лунки на кварците (б)

Полученные результаты показали, что с учетом твердости крепких пород (кварциты), наиболее близким модельным материалом является алмазный отрезной диск. Абразивный круг, имея высокоабразивные зерна, является недостаточно твердым из-за того, что содержит много пор и его твердость определяется недостаточно прочной связкой, которая должна обеспечивать выкрашивание абразивных зерен при шлифовании материалов. Кроме того, большая глубина внедрения резца вызовет быстрый износ круга при испытаниях и необходимость его замены. Поэтому дальнейшая разработка методики сертификационных испытаний PDC-резцов проводилась с использованием алмазного отрезного диска.

3.2 Разработка критерия отказа PDC долот при эксплуатационном разрушении резцов

Процесс бурения алмазными долотами за счет резания породы подразумевает, что для этого режущие кромки резцов должны иметь возможность

внедряться в забой на некоторую глубину за счет действия осевых сил. Если резцы утратят возможность врезаться в породу, они начнут скользить по ней и процесс резания сменится гораздо более медленным и неэффективным процессом изнашивания забоя. При этом смена режима резания процессом трения чревато перегревом резцов и появлением термических трещин на резцах (такое повреждение имеет кодировку НС в системе IADC) и их сломом, что ведет к появлению на забое сверхтвердых обломков. Поэтому условие внедрения резцов в породу можно принять за критерий работоспособности бурового долота.

Рассмотрим в общем виде задачу оценки глубины вдавливания вращающегося алмазного долота в породу, твердостью HPDC (МПа) под осевой нагрузкой F_n (Н) если диаметр породоразрушающих резцов составляет D (мм), а количество резцов в забуривающей части N (шт). Для этого рассмотрим долото как своего рода мультивершинный индентор, где каждая режущая кромка, обращенная к забою, несет на себе часть осевой нагрузки и внедряется в забой, преодолевая сопротивление внедрению (или твердость) материала породы.

Из теории контактного взаимодействия [92, 93] известно, что фактическая площадь контакта двух неупругих неровных тел определяется величиной приложенной нормальной нагрузки F_n и твердостью более мягкого материала из двух контактирующих тел. Учитывая, что твердость поликристаллической алмазной пластины намного выше, чем прочность любой породы, включая корунды, то для оценки площади фактического контакта A_r берется величина твердости разбуриваемой породы $HPDC_{пор}$.

$$A_r = \frac{F_n}{HPDC_{пор}}, \text{мм}^2 \quad (3.1)$$

В первом приближении можно принять величину твердости, найденную стандартными методами Бринелля или Виккерса, имеющие размерность МПа, но от единиц давления твердость отличается тем, что давление – это нормальная сила, приходящаяся на единицу площади проекции отпечатка на ортогонально расположенную плоскость, а твердость – это сила, приходящаяся на единицу поверхности отпечатка от вдавливания индентора. Поскольку отпечаток не

является плоским, то величина твердости будет зависеть от формы индентора. Однако с некоторым приближением неглубокий сферический отпечаток, получаемый при вдавливании шарика можно приблизительно приравнять площади проекции отпечатка на нормальную плоскость.

Таким образом, выражение (3.1) позволяет рассчитать суммарную площадь контакта долота с забоем, достигнув которой долото утратит способность врезаться в конкретную породу под действием заданной осевой нагрузки. При внедрении долота в породу эта площадь распределяется по всем PDC-резцам (в идеальном случае – равномерно). Следовательно, критерием прекращения резания породы можно считать достижение равенства суммарной площади контакта всех резцов A_{Σ} и площади A_r , рассчитываемой по формуле (3.1).

Величина A_{Σ} зависит от количества резцов, внедряемых в забой, степени внедрения и степени износа режущих кромок, т.е.

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n (A_{pi} + A_{ni}), \quad (3.2)$$

где n – количество резцов долота, вдавливаемых в забой под действием осевой нагрузки; A_i – площадь контакта резца с забоем; A_{pi} – часть площади контакта резца, сформированная соприкосновением режущей кромки с породой; A_{ni} – часть площади контакта резца, сформированная изношенной поверхностью режущей кромки. Тогда можно записать:

$$\frac{F_n}{HPDC_{пор}} = \sum_{i=1}^n (A_{pi} + A_{ni}). \quad (3.3)$$

Площадь A_{pi} для новых резцов быстро растет по мере их внедрения в породу, начиная с практически точечного контакта при соприкосновении фаски поликристаллической алмазной пластины и породы. Наклон резца к забою обеспечивает задний угол, исключая трение задней поверхности по забою.

По мере изнашивания резцов в расчетах появляется дополнительная составляющая – площадь износа A_{ni} , которая упирается в породу, препятствуя проникновению режущей кромки в забой и, соответственно – самому процессу резания. Анализ равенства (3.3) показывает, что долото с неизношенными резцами имеет возможность резать даже твердые породы со скоростью, определяемой величиной их твердости, так как площадь A_{Σ} будет формироваться за счет внедрения режущих кромок. При износе резцов все большая доля площади контакта будет формироваться за счет совокупной площади износа A_{ni} . Таким образом разрушенная поверхность сопротивляется внедрению режущих кромок в породу, а, соответственно, и резанию, уступая место медленному изнашиванию породы плоскими (изношенными) поверхностями резцов.

При достижении равенства $A_r = A_{ni}$ дальнейшее возобновление резания возможно только за счет: увеличения осевой нагрузки на долото до допустимых пределов; использовании долота на более мягких породах с меньшей твердостью; при замене разрушенных резцов на новые; при повороте резцов по оси, при котором на место изношенной кромки встанет неизношенная часть кромки. Кроме того, работоспособность долота может восстановиться при «удачном» скалывании резца, когда вновь сформированная кромка приобретает задний угол за счет изнашивания или скола твердосплавной подложки. Также в ряде работ упоминается [94, 95, 96, 97, 98], что PDC резцы имеют возможность самозатачиваться в процессе работы долота за счет более быстрого изнашивания твердосплавной подложки, вследствие чего компонента A_{ni} уменьшается. Однако при этом не наблюдаются начальные показатели эффективности бурения, и коммерческая скорость проходки может оказаться недостаточно высокой. В этом случае возможно более эффективным методом окажется заточка твердосплавной подложки алмазным инструментом для формирования заднего угла на изношенных резцах во время ремонта долота.

Исходя из вышесказанного, можно записать критерий работоспособности алмазного долота в виде

$$\sum_{i=1}^n (A_{ii}) < \frac{F_n}{HPDC_{пор}} - \sum_{i=1}^n (A_{pi}). \quad (3.4)$$

В данном соотношении важно отметить, что ненулевая составляющая $\sum_{i=1}^n (A_{pi})$ означает, что процесс резания сохраняется, но существует некоторая ее минимальная граница. Это обусловлено тем, что площадь резания напрямую связана с глубиной внедрения резцов и, соответственно с механической скоростью бурения, для которой существует минимальный предел, обеспечивающий минимально допустимую (экономически целесообразную) производительность строительства скважины, которая в свою очередь зависит от минимально приемлемой скорости бурения V_{Mmin} . Поэтому практически целесообразным критерием работоспособности алмазного долота будет соотношение:

$$\sum_{i=1}^n (A_{ii}) < \frac{F_n}{HPDC_{пор}} - \sum_{i=1}^n (A_{pi})_{min}, \quad (3.5)$$

где $\sum_{i=1}^n (A_{pi})_{min} = f(V_{Mmin})$.

Для возможности практического использования данного критерия необходимо выявить соотношение между площадью контакта и глубиной внедрения PDC-резца в породу.

Площадь изношенной части резцов проявляется в виде лыски на резцах после наработки на забое. Соответственно, площадь этих лысок можно приблизительно оценить наложением миллиметровой сетки или более точно путем фотографирования резцов и последующего компьютерного анализа. Отличить лыску от удачного скола можно по тому признаку, что изношенная поверхность более ровная, чем скол. При «удачном» сколе можно видеть образование выступа PDC-пластины над твердосплавной основой. На практике по внешнему виду поверхность скола от поверхности износа отличить нетрудно. На практике можно оценить только A_{ii} , поскольку она наглядна, а площадь A_{pi} рассчитывается как разность общей площади контакта, формируемой под заданной нагрузкой в материале с заданной твердостью и поверхности износа.

3.3 Выводы по 3-й главе

1. На основе проведенных исследований установлено, что в качестве контртела для лабораторных испытаний PDC-резцов на поверхностное разрушение целесообразно брать алмазный инструмент, в частности алмазный отрезной круг, имеющий твердость более 15 ГПа, сопоставимую с твердостью крепких пород.

2. Разработаны новые методы и специализированное оборудование для оценки твердости горных пород методами вдавливания и царапания горных пород поликристаллической алмазной пластины диаметром 13,3 мм в составе PDC-резца, которые позволяют устанавливать взаимосвязь между глубиной внедрения резца в конкретную породу, осевой нагрузкой, шириной борозды и площадью контакта с породой.

3. Разработан критерий оценки работоспособности PDC долот с учетом степени износа резцов, твердости разбуриваемой породы, режимов бурения и показателями экономической целесообразности.

4. Предлагаемые методы и устройства оценки твердости горных пород имеют большой научный потенциал для изучения влияния расположения, формы и размеров резцов на их работоспособность по различным горным породам.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДИКИ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ PDC-РЕЗЦОВ

4.1 Разработка схемы и специализированного оборудования для оценки стойкости PDC-резцов к поверхностному разрушению при трении о закрепленный абразив

Для оценки стойкости зубков к поверхностному разрушению были рассмотрены несколько лабораторных схем испытаний, имеющих различную техническую реализацию и стоимость расходных материалов. Во всех случаях по поверхности PDC-резца в течение заданного времени скользит прижатое к нему контртело. Как было установлено в предыдущей главе, наиболее рационально в качестве контртела использовать алмазный абразивный инструмент, содержащий зерна алмазов в металлической матрице.

Критерии качества при триботехнических испытаниях резцов могут быть выражены величиной разрушения (весового или линейного) и интенсивности разрушения, определяемой как отношение величины износа к обусловленному пути трения. При испытаниях нормируется нормальное давление на поверхности трения, состав среды, размеры и форма абразивного инструмента.

Наибольшую эффективность показал метод, при котором производят разрушение кромки алмазного резца о торцовую поверхность рабочей (содержащей алмазы) части алмазного отрезного диска, закрепленного в оправке, устанавливаемой в патрон сверлильного станка (рисунок 4.1).

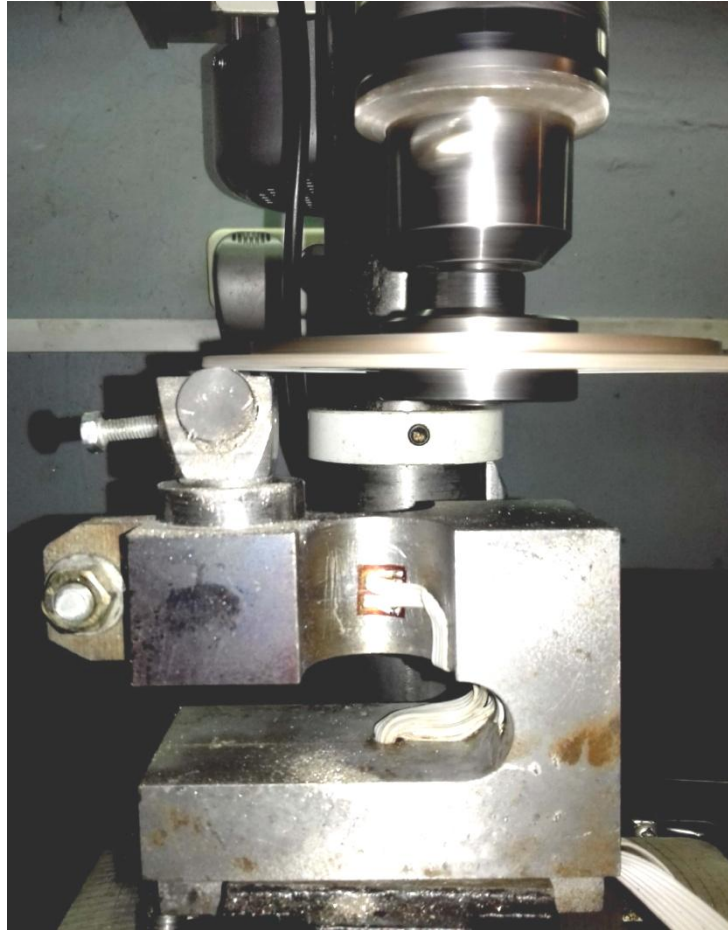


Рисунок 4.1 – Испытания резцов на поверхностное разрушение при трении о рабочую поверхность алмазного отрезного диска

Испытуемый резец устанавливают в специальную оправку (рисунок 4.2), обеспечивающую угол наклона алмазной поликристаллической пластины к поверхности контртела (отрезного диска) идентичный углу наклона резцов, в алмазных долотах.

В качестве контртела первоначально использовали алмазные отрезные диски (рисунок 4.3) диаметром 115 мм. Один диск может использоваться дважды (по одному разу с каждой стороны).

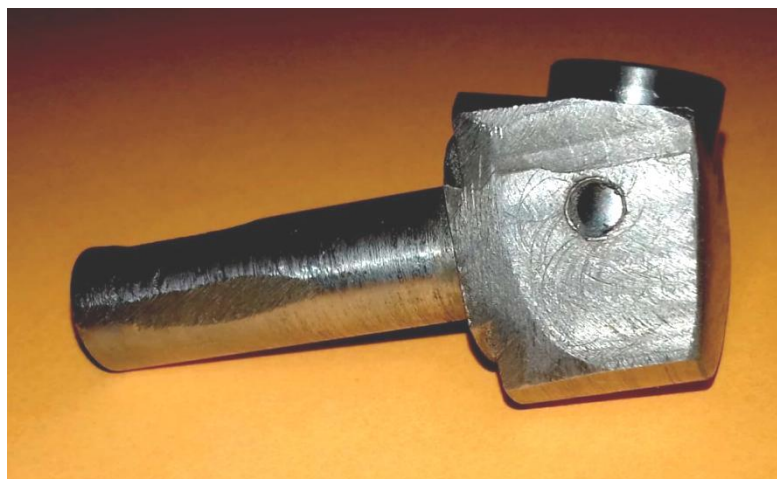


Рисунок 4.2 – Установка зубка в оправке



Рисунок 4.3 – Диски, используемые в качестве контртела:
а) в упаковке; б) в оправке

При испытаниях алмазных резцов с конической вершиной разрушение проводилось как по кромке, так и по вершине (рисунок 4.4).

Резцы в оправках фиксировали в измерительном блоке, оснащенном датчиками нормальной нагрузки и силы трения. Эти данные оцифровывались сертифицированной системой сбора данных E 14-440 производства фирмы L-Card и передавались на компьютер, где проводился мониторинг режимов испытаний с помощью программного обеспечения PowerGraph [105].



Рисунок 4.4 – Испытания зубков с конической алмазной вставкой на поверхностное разрушение при трении о боковую поверхность алмазного отрезного диска

После испытаний на поверхностное разрушение определяли две характеристики износа (рисунок 4.5): а) линейный износ – по разнице показаний микрометрического индикатора часового типа (цена деления 1 мкм) до и после испытаний; б) ширина лыски (пятна износа) на кромке резца, формируемая при поверхностном разрушении. Размер лыски определялся с помощью цифрового микроскопа.

В результате проведенных исследований выбраны следующие оптимальные режимы испытаний:

- нормальная нагрузка на контакт «диск – кромка зубка» – 250 Н;
- частота вращения диска – 200 мин⁻¹;
- длительность испытаний – 10 минут;
- вид трения – сухое трение скольжения.

В результате испытаний формируется отчетливое пятно износа, позволяющее легко ранжировать резцы по износостойкости. Низкая частота

вращения диска обеспечивает отсутствие сильного нагрева пары трения, что позволяет исключить необходимость водяного охлаждения диска.

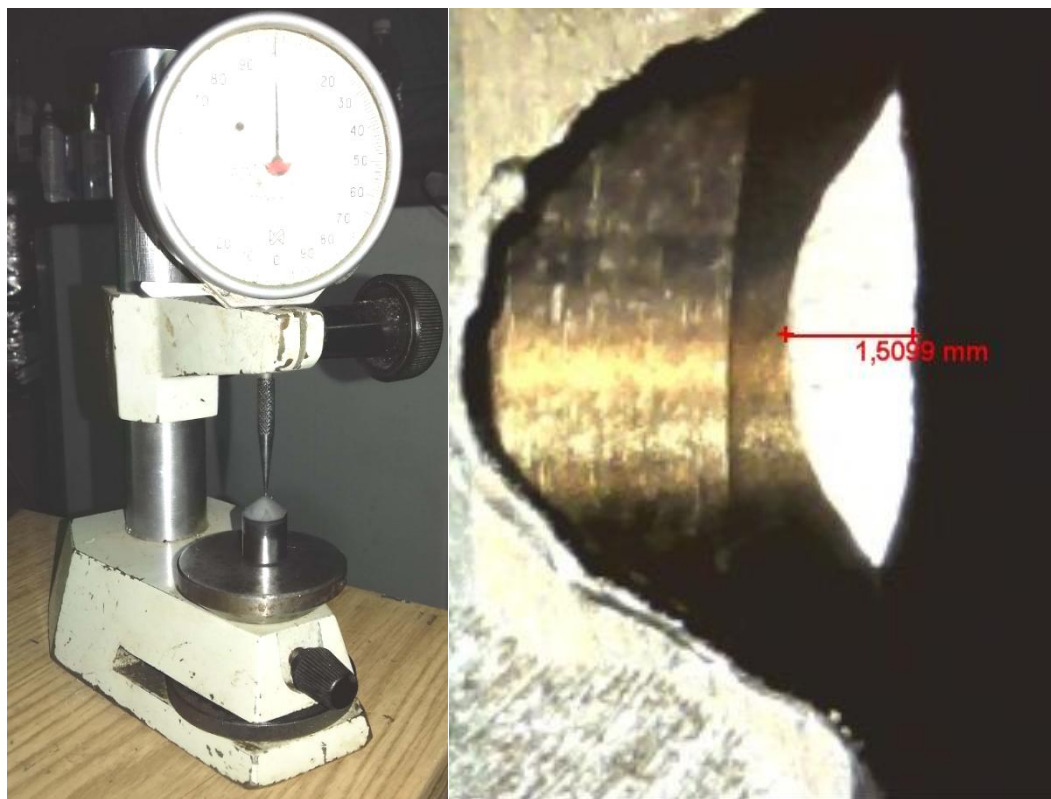


Рисунок 4.5 - Оценка характеристик износа зубков:
а) линейный износ; б) ширина изношенного участка на кромке зубка

Методика испытаний на поверхностное разрушение выполнялся по следующим этапам:

1. Включение измерительной системы и прогрев датчиков в течение 15 мин.
2. Установка резца в оправке и измерение начальной высоты кромки резца (в наиболее высокой части).
3. Установка алмазного диска в оправку неизношенной стороной вниз (противоположно хвостовику оправки) и закрепление в патроне станка.
4. Оправку с зубком фиксируют во втулке измерительного блока так, чтобы кромка зубка касалась алмазного диска в центральной зоне алмазосодержащего слоя.

5. Выбор нагрузки на рычаг, которая обеспечивает осевую нагрузку (около 250 Н) на контакт «кромка резца – диск».
6. Разгружают контакт и обнуляют показания датчиков осевой нагрузки.
7. Включают стенд, запускают на компьютере сбор данных и плавно опускают вращающийся алмазный диск на кромку резца.
8. Проводятся испытания в течение 10 минут.
9. Измеряется средняя температура нагрева резца термопарой К-типа.
10. Остановка стенда, разгрузка узла трения и остановка сбор данных.
11. Извлечение резца из измерительного блока и измерение высоты резца после разрушения. Расчет линейного износа резца.
12. Резец в оправке устанавливают под микроскоп и определяют размеры пятна износа. Заносят все данные в протокол испытаний.

При необходимости испытания можно проводить на одном резце до 4-5 раз, поворачивая его по оси, испытывая неизношенные участки.

4.2 Апробация пилотной методики и специализированного оборудования для оценки стойкости PDC-резцов к поверхностному разрушению при трении о закрепленный абразив

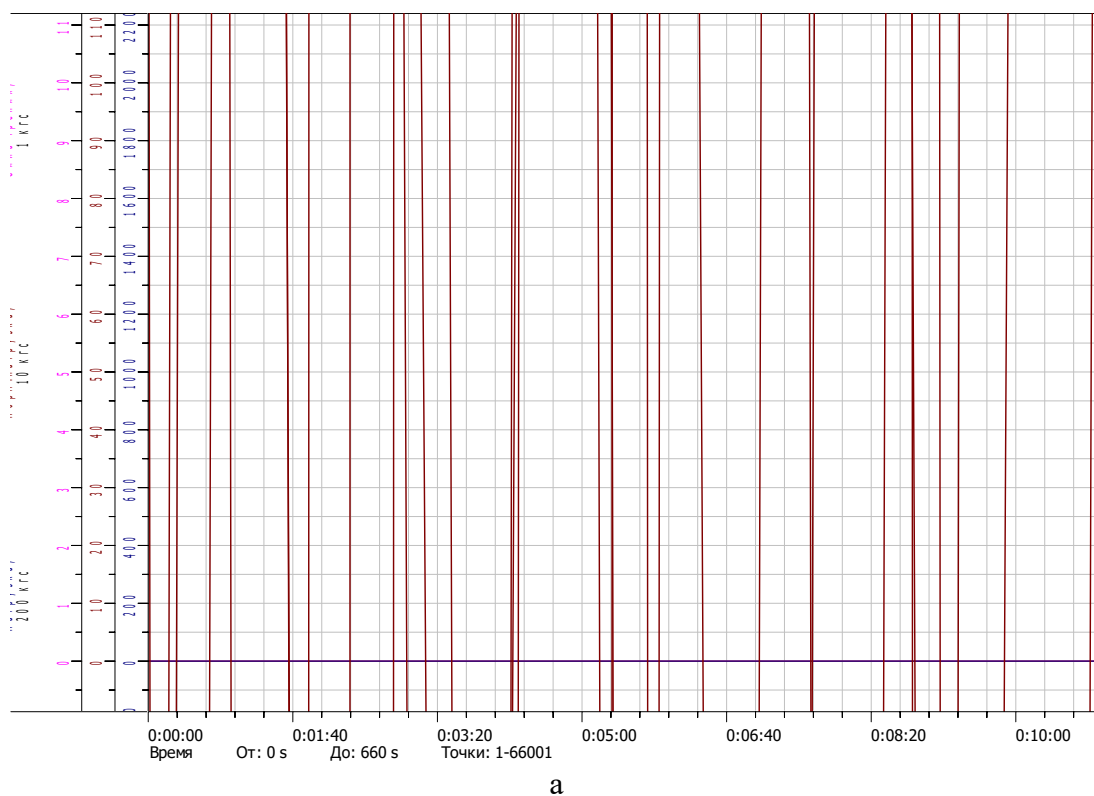
Для оценки эффективности разработанного метода были испытаны 5 партий PDC-резцов, различных типоразмеров. Для возможности идентификации резцов боксы и PDC резцы в них были промаркированы (рисунок 4.6).

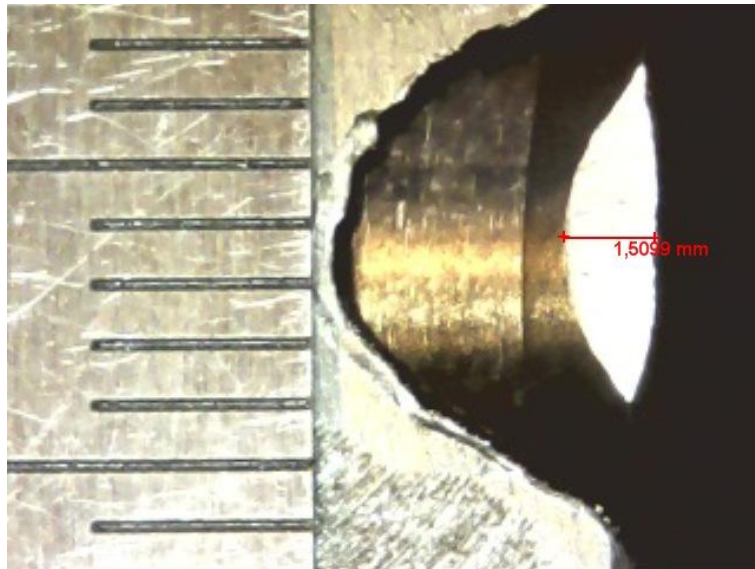
Форма поликристаллической алмазной пластины PDC-резцов 17 – 20 (таблица 4.1) имеет коническую форму в отличие от других резцов, имеющих традиционную цилиндрическую форму.



Рисунок 4.6 – Пример маркировки резцов 1-4 в боксе №1 (1616 XSP) для средне-твердых пород

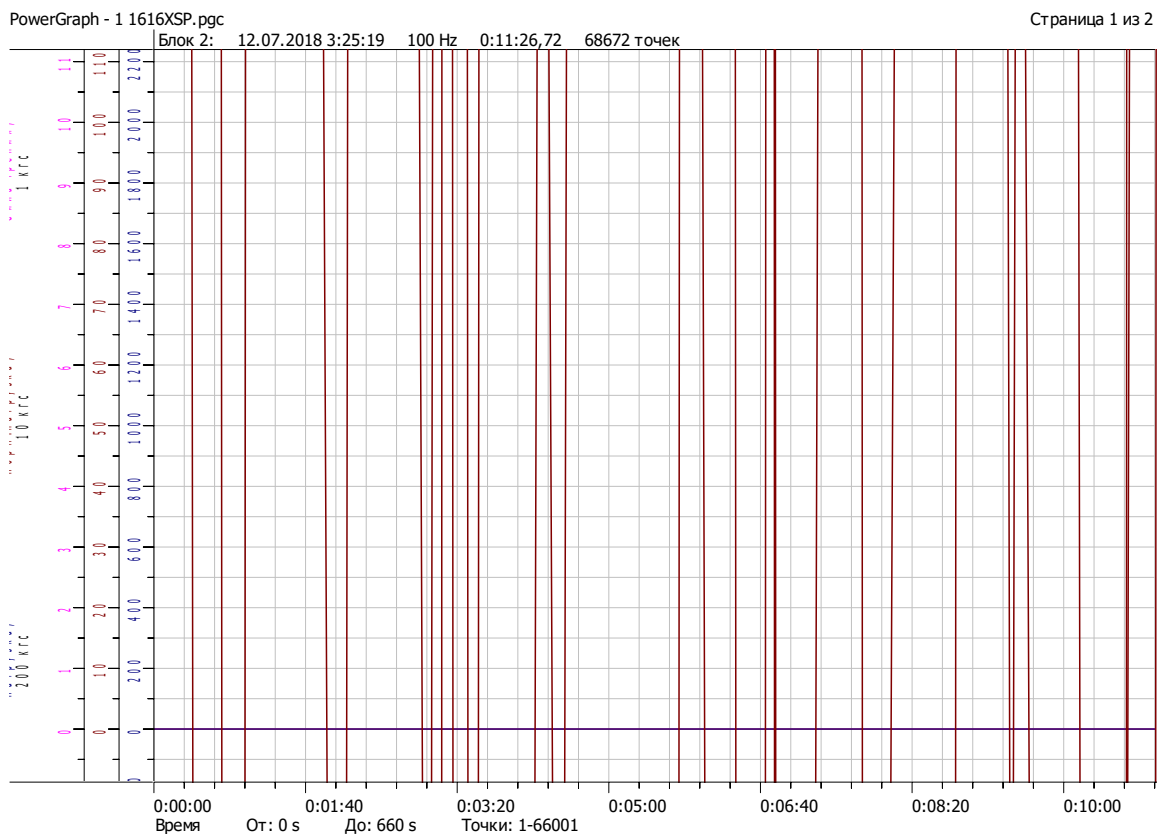
Результаты испытаний первых двух резцов на поверхностное разрушение представлены на рисунках 4.7-4.8, а также в сводной таблице 4.1.



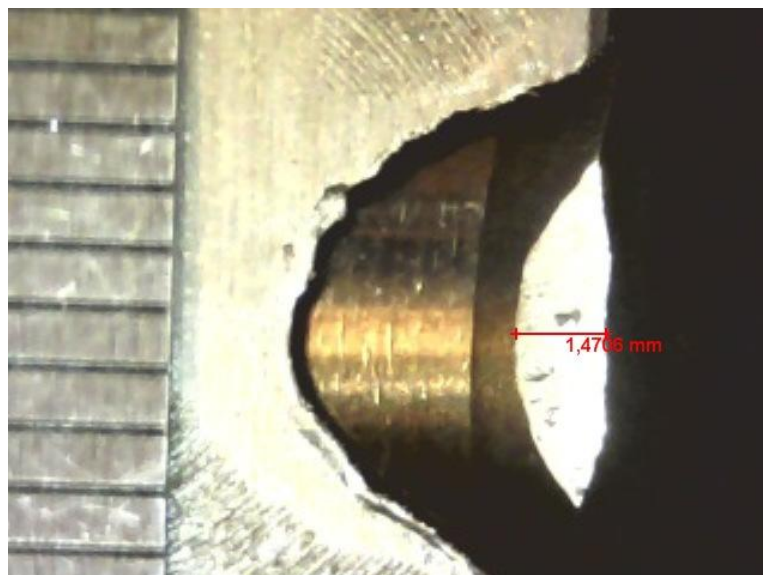


б

Рисунок 4.7 – Эпюры испытаний на стойкость к поверхностному разрушению (а) и вид пятна износа с результатами измерений размера лыски на резце № 1 при испытаниях по схеме «кромка резца – алмазный диск»



а



б

Рисунок 4.8 – Эпюры испытаний на стойкость к поверхностному разрушению (а) и вид пятна износа с результатами измерений размера лыски на резце №2 при испытаниях по схеме «кромка резца – алмазный диск»

Таблица 4.1 – Сводная таблица по результатам исследования качества PDC-резцов

Характеристика образцов		Испытания на поверхностное разрушение*			
№ партии (бокса), обозначение	№ резца	Средняя (максимальная) сила трения, Н	Длина изношенного участка, мм	Линейный износ, мм	Температура, °С
№1 1616 X SP – повышенная ударопрочность для работы в трещиноватых и неоднородных породах.	1	36 (55)	1,5099	0,285	124
	2	39 (55)	1,4705	0,274	127
	3	41 (60)	1,4118	0,268	139
№2 1616 XTSP- повышенная ударопрочность для бурения пород средней и высокой твердости, а также в абразивных пластах	5	37 (48)	1,5103	0,271	115
	6	33 (52)	1,7455	0,298	112
	8	39 (59)	1,6489	0,198	110

№3 1616 M8 SP- для работы в условиях высоких ударных нагрузок и абразивного износа	11	43 (55)	1,0695	0,195	135
	12	39 (49)	1,3139	0,191	134
	13	43 (56)	1,5109	0,272	148
	14	34 (45)	1,5099	0,242	124
	15	39 (52)	1,5706	0,272	138
	16	40 (53)	1,5882	0,263	132
№4 1319 ACSP- для бурения пород средней и высокой абразивности	17	46 (58)	1,4314	0,175	217
	18	51 (60)	1,7265	0,140	190
	19	40 (46) / 42 (61)	1,3927/ 2,1962	0,203 (0,307)	175
	20	45 (63)/ 45 (67)	1,4711/ 2,0784	0,148 (0,292)	203
2 серия испытаний, бокс №1, OR- резцы с острой кромкой, для бурения мягких и вязких горных пород	2	55 (75)/ 55 (75)	1,400/ 1,423	0,281/ 0,294	174/ 181
	4	45 (60)/ 40 (60)	1,468/ 1,457	0,298/ 0,284	175/ 164
	6	30 (55)	1,378	0,285	138
	7	45 (65)	1,297	0,285	184
	8	45 (65)	1,400	0,263	173
ZTAS-1613PZ – резцы повышенной вязкости и ударопрочности глубоко выщелоченные	1	40 (55)	1,099	0,202	256
	4	30 (46)	1,091	0,182	287
	5	48 (74)	1,125	0,165	305
	6	31 (43)	1,003	0,175	268
	7	35 (52)	1,063	0,152	298
Резцы с CVD обработкой- премиальный сегмент для бурения в самых сложных условиях (высокотемпера- турные скважины, абразивные пласты)	25	40 (65)	1,431	0,256	324
	26	41 (60)	1,401	0,245	365

* Режимы испытаний на стойкость к поверхностному разрушению: нормальная нагрузка 250 Н; частота вращения 200 мин-1; контртело – алмазный отрезной диск Ø115мм; схема испытаний «кромка зубка - диск»; сухое трение, время испытаний – 10 минут.

Резцы с меткой ZTAS-1613PZ показали самые высокие показатели устойчивости к поверхностному разрушению.

Экспериментальные резцы с CVD обработкой (обозначены под номерами 25, 26) показали средние показатели стойкости к поверхностному разрушению при высокой работе трения и температуре саморазогрева.

Несмотря на возможность проведения сравнительных испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению и разделению их на более и менее стойкие проведенные испытания показали ряд недостатков использованной методики. Различие между резцами с высокой и низкой стойкостью к поверхностному разрушению оказалось недостаточным, а разница в показателях составила около 1,5 раз. Было принято решение по увеличению пути трения за счет использования алмазного отрезного диска диаметром 125 мм и увеличения длительности испытаний до 30 минут. При этом в целях избегания сильного нагрева резцов и для предотвращения схватывания трущихся поверхностей нормальная нагрузка была снижена до 200 Н.

Второй недостаток касался метода оценки износа. Оказалось, что линейный износ перестает быть объективным при испытаниях резцов с 3D поверхностью алмазной поликристаллической пластины. Альтернативной методикой является оценка весового разрушения, как разницы, между начальной массой резца перед испытаниями на трение и массой резца после этих испытаний.

Третий недостаток заключался в аппаратной части испытаний – недостаточный теплоотвод приводил к перегреву корпуса измерительного блока и возникновению тепловых искажений показаний тензометрических датчиков силы трения и нормальной нагрузки. Для решения данной проблемы была усовершенствована система охлаждения: добавлены дисковый радиатор и вентилятор. При этом дисковый радиатор одновременно служил защитным экраном от попадания частиц износа на измерительные датчики.

Четвертый недостаток заключался в том, что методически неверно при испытаниях на поверхностное разрушение не учитывать тот факт, что перед эксплуатацией все резцы подвергаются 100%-ому термическому воздействию во время пайки к корпусу долота. Принято решение подвергать резцы перед испытаниями на изнашивание нагреву до температуры 750 °С (температура

имитирующая термическое воздействие на PDC резцы во время технологической операции их лужения и пайки латунными и серебряными припоями к корпусу долота) с выдержкой не менее 15 секунд на каждый миллиметр толщины резца для равномерного прогрева.

Помимо оценки скорости разрушения режущей кромки PDC-резцов предложено оценивать их агрессивность по отношению к металл-алмазному «забою» путем определения скорости весового разрушения контртела. Более агрессивными к металлическому забою оказались резцы с меньшим содержанием пластичной кобальтовой связки. Интересен также комплексный параметр, характеризующий эффективность резца при трении – количество снятого забоя (в мг), приходящаяся на 1 мг весового износа режущей кромки резца. Этот безразмерный показатель обычно находится в диапазоне 500...900.

4.3 Разработка усовершенствованного специализированного оборудования и методики лабораторных испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению

При разработке оборудования для лабораторных испытаний резцов на поверхностное разрушение были приняты следующие предпосылки. Поскольку конструкция долота предусматривает наклонное (как правило, под углами от 5° до 30°) по отношению к забою расположение резцов, при котором с породой контактирует не вся поверхность резца, а только выступающий край алмазной поликристаллической пластины (рабочая кромка). Было принято задавать за счет геометрии оснастки угол, близкий к среднему в указанном диапазоне – 15° .

Рекомендуемая нагрузка на фрикционный контакт составляет 196,2 Н. Более высокие нагрузки приводят к появлению очагов схватывания PDC-резца с алмазным ободом, сильному разогреву контакта (свыше 300°C), а также быстрому выходу из строя алмазного круга без возможности его вторичного использования. По этим же причинам скорость вращения круга была ограничена до 200 об/мин. Меньшие нагрузки приводят к необходимости увеличения длительности испытания для формирования заметного износа. Исследования показали, что

характерные величины силы трения между резцом и алмазным ободом при выбранной нормальной нагрузке составляют около 60...70 Н, что при диаметре отрезного диска 115 мм соответствуют моменту трения 3,6...4,2 Н·м. Для реализации такого усилия рекомендуется использовать привод мощностью не менее 400 Вт. В качестве такого привода можно использовать модернизированные вертикально сверлильные станки с оснащением их рычажной системой нагружения [106-108].

С учетом практического опыта по разработке экспериментального оборудования полученного на кафедре машин и оборудования нефтегазовых и химических производств Самарского государственного технического университета был разработан лабораторный программно-аппаратный комплекс (рисунки 4.9 – 4.10). Схема узла трения данного комплекса показана на рисунке 4.9. Вращающимся является модельный «забой» относительно неподвижного резца, наклоненного по отношению к «забою» под эксплуатационным углом и врезающегося в него краем поликристаллической алмазной пластины.

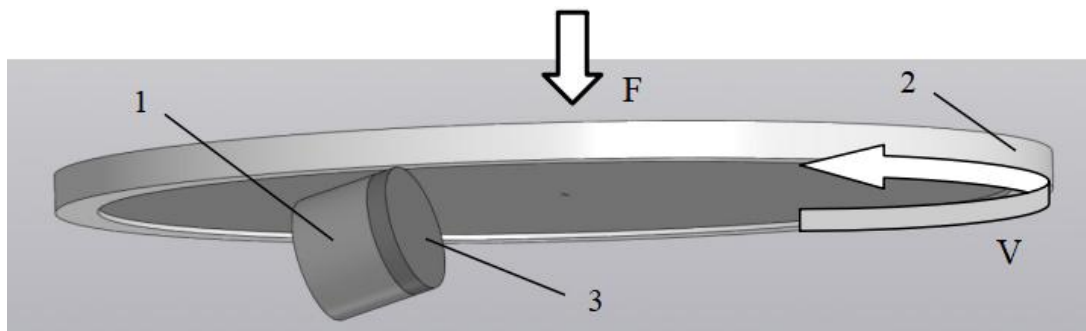


Рисунок 4.9 – Предлагаемая схема испытаний резцов на стойкость к поверхностному разрушению: 1 – испытуемый резец; 2 – контртело (алмазный отрезной диск); 3 – поликристаллическая алмазная пластина; F – фиксированная нормальная нагрузка; V – линейная скорость вращения алмазного отрезного диска

Конструкция устройства для проведения испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению представлена на рисунке 4.10.

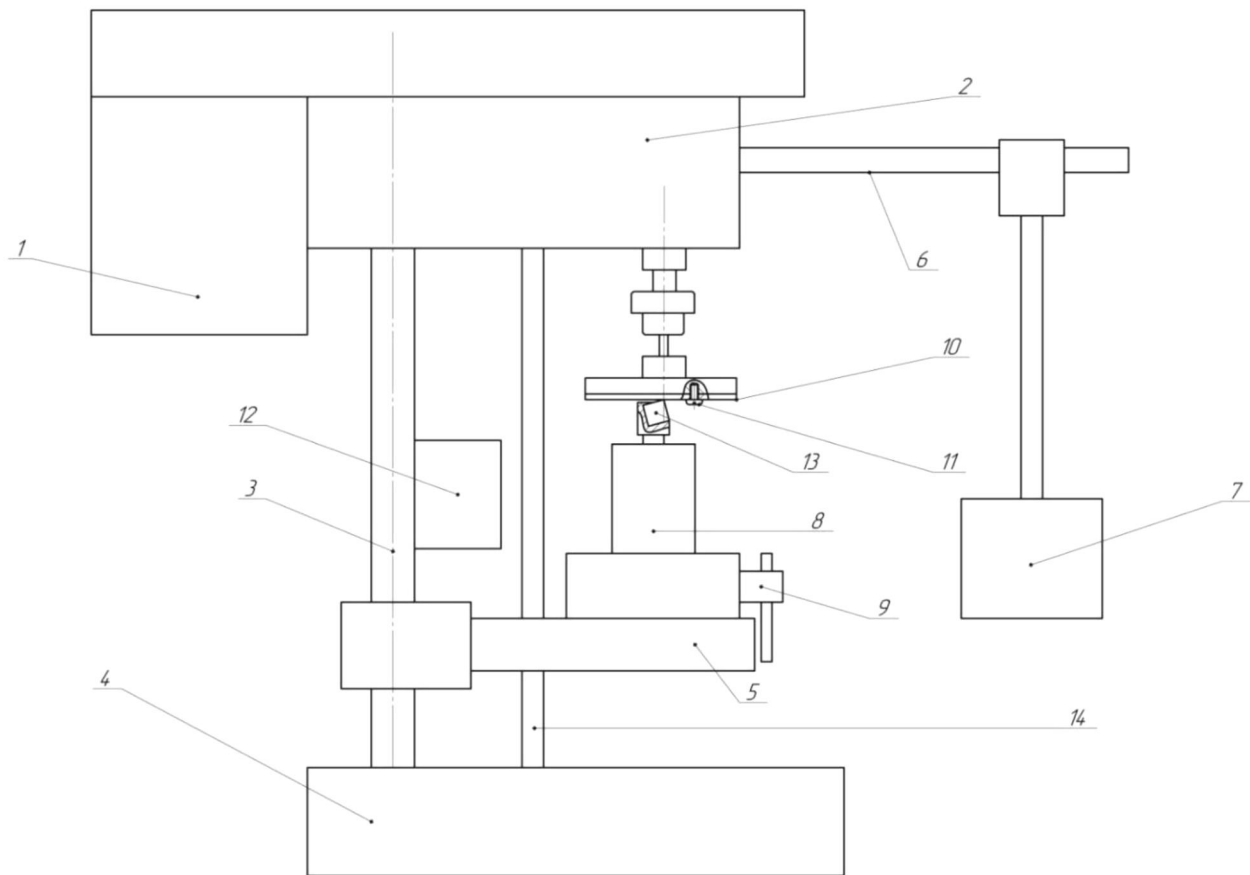


Рисунок 4.10 – Специализированное оборудование для испытания PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению: 1 – электродвигатель; 2 – шпиндельный узел; 3 – стойка; 4 – основание; 5 – консольный стол; 6 – рычаг; 7 – груз; 8 – система сбора данных; 9 – тиски; 10 – алмазный отрезной диск; 11 – фиксатор; 12 – охладитель; 13 – PDC-резец; 14 – стяжка [109]

Основными компонентами испытательного стенда являются:

1. Привод: состоит из электродвигателя, шпиндельного узла, стойки, основания и консольного стола. В качестве привода можно использовать станки сверлильной или сверлильно-фрезерной группы. Доработка станка включает установку рычажной системы нагружения, позволяющей создавать осевую нагрузку до 200 Н. Предпочтительно использовать станки с возможностью осевого перемещения консольного стола по зубчатой рейке.

2. Система мониторинга экспериментальных данных – состоящая из измерительного блока (рисунок 4.11), системы сбора данных E14-140 и программного обеспечения PowerGraph. Измерительный блок оснащен датчиками температуры, нормальной нагрузки и тангенциальной нагрузки. В нижней части

моноблока имеется хвостовик для закрепления в тисках на консольном столе. В верхней части имеется вертикальное отверстие с хомутом, позволяющее фиксировать оправку с испытуемым резцом. Диапазон измеряемых значений датчиков: температура – до 600 °С, нормальная нагрузка – до 1000 Н, сила трения – до 500 Н. Программное обеспечение позволяет производить калибровку датчиков и строить эпюры измеряемых величин в режиме реального времени с принятой частотой сбора данных 100 Гц.

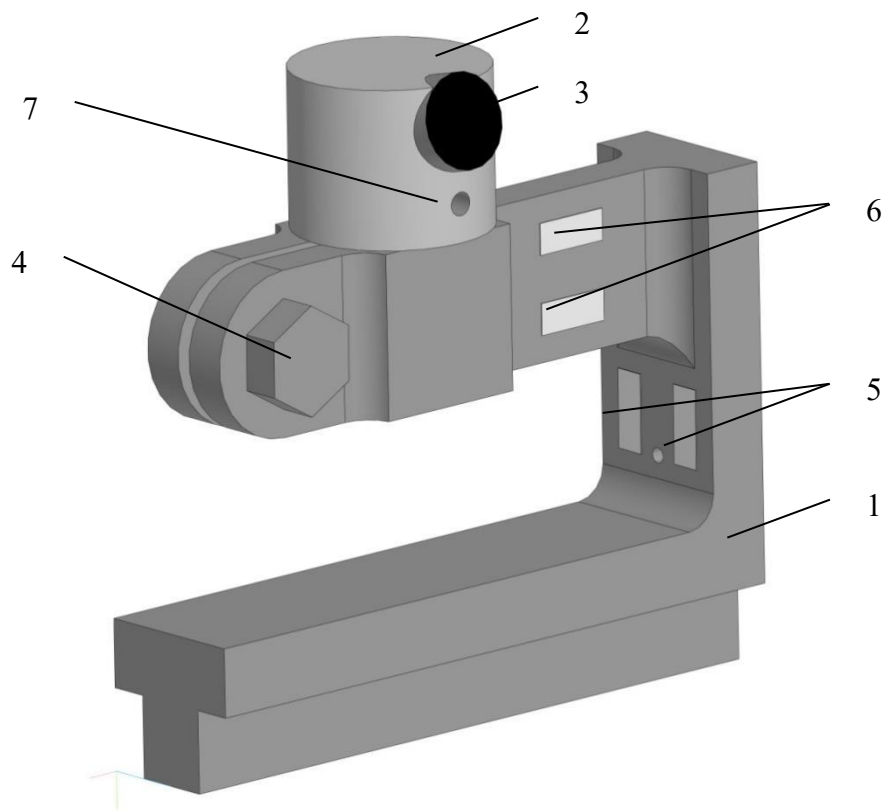


Рисунок 4.11 – Измерительный блок без корпуса: 1 – моноблок; 2 – оправка; 3 – PDC-резец; 4 – болт хомута; 5 – датчики осевой нагрузки; 6 – датчики силы трения (тангенциальной нагрузки); 7 – технологическое отверстие для термопары

3. Оправка для PDC-резца обеспечивает его надежную фиксацию на моноблоке и обеспечивает заданный угол расположения резца. Для унификации испытаний для всех резцов был принят единый угол 15°.

4. Оправка для контробразца (рисунок 4.12) позволяет фиксировать алмазный отрезной диск в патроне привода и исключает возможность изгиба

алмазного отрезного диска под действием осевой нагрузки. Кроме того, оправка дополнительно оборудована фиксатором, который предотвращает возможность проворота алмазного отрезного диска вокруг оси вращения при высоких моментах трения во время испытаний, таким образом обеспечивая одинаковый путь трения при испытаниях различных PDC-резцов и, соответственно, повышая достоверность полученных результатов.

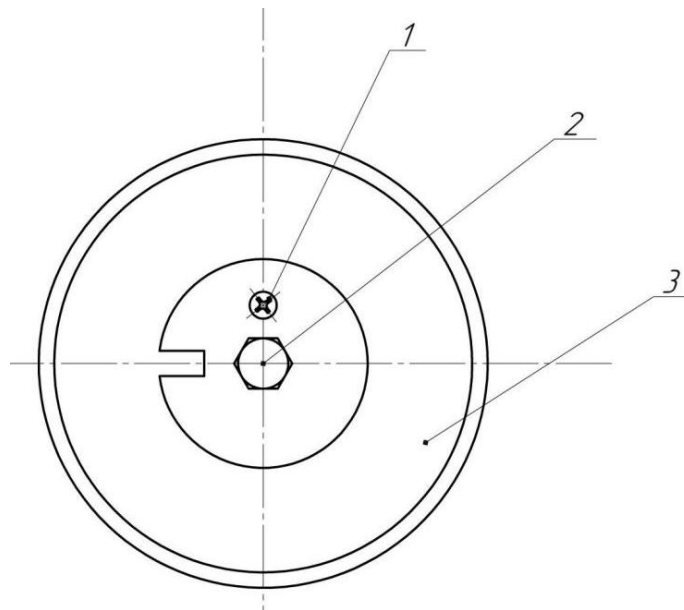


Рисунок 4.12 – Оправка для контробразца: 1– отверстие под фиксатор, 2– установленный фиксатор

Таким образом, была разработана методика испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению, которая проводится при следующих режимах:

- схема трения: «кромка резца – алмазный диск»;
- контактная нагрузка – 200 Н;
- частота вращения металлического «забоя» – 200 об/мин;
- контробразец («забой») – алмазный отрезной круг (125 мм);
- образцы – два PDC-резца с одинаковой наработкой;
- угол крепления образца относительно «забоя» – 15°;
- время испытаний – 30 мин;
- трение без смазки (сухое);

-непрерывный сбор данных о нормальной нагрузке, приложенной на контакт и силе трения и периодический контроль температуры [110].

Экспериментальное оборудование, разработанное для проведения испытаний, имеет широкий потенциал применения не только в области бурения скважин, но и в других областях, где требуется оценка износостойкости материалов при воздействии абразивных сред.

Новизна разработанной методики по сравнению с аналогичными патентами [111], [112] состоит в повышении достоверности и расширение функциональных возможностей получаемых результатов испытаний PDC-резцов на абразивное изнашивание, и защищена патентом № 2821172 С1.

Технический результат достигается тем, что в методике испытания PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению, в котором испытываемый PDC-резец фиксируют в специальной оправке, оправку с резцом PDC фиксируют в измерительном блоке, включают привод и сбор данных на компьютере, опускают на испытуемый PDC-резец алмазный отрезной диск, нагружают контакт, проводят испытание на стойкость к поверхностному разрушению резца PDC об алмазные частицы в течение определенного времени, в процессе испытаний контролируют величину нормальной нагрузки, силу трения и температуру резца PDC, после испытаний определяют величину износа, по которой судят об износостойкости резца PDC, при этом перед испытаниями измерительный блок устанавливают на столе привода таким образом, чтобы алмазный отрезной диск при опускании касался верхней части кромки резца PDC в средней части торца алмазосодержащего слоя, скорость движения алмазного отрезного диска относительно резца PDC устанавливают аналогичной скорости движения резца PDC относительно забоя, при этом перед испытанием резца PDC на стойкость к поверхностному разрушению производят его нагрев до температуры в диапазоне 600-800 °С, а в алмазном отрезном диске просверливают отверстие под фиксатор диска, после испытаний дополнительно проводится оценка износа алмазного отрезного диска, во время проведения испытаний производится охлаждение измерительного блока.

Новизна разработанного устройства сравнению с аналогичными [111], [113] состоит в повышении достоверности и расширение функциональных возможностей получаемых результатов испытаний PDC-резцов на абразивное изнашивание и защищена патентом № 2821174 С1.

Технический результат достигается тем, что устройство для реализации способа, включает в себя привод, измерительный блок, оправку, систему сбора данных, компьютер и программное обеспечение для обработки, мониторинга и хранения экспериментальных данных, алмазный отрезной диск с оправкой, позволяющей фиксировать алмазный отрезной диск в патроне привода и исключающей возможность изгиба алмазного отрезного диска под действием осевой нагрузки, а оправка для фиксации резца PDC изготовлена таким образом, что зафиксированный в ней PDC-резец располагается по отношению к плоскости алмазного отрезного диска под углом, аналогичным углу расположения резца PDC в буровом долоте к поверхности забоя, при этом заявленное устройство дополнительно содержит охладитель измерительного блока, оправка алмазного отрезного диска содержит дополнительный фиксатор, а основание, консольный стол и шпиндельный узел дополнительно связаны стяжкой.

4.4 Апробация усовершенствованной методики и средств испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению

Итоговая апробация методики и средств испытаний проводилась на четырех новых PDC-резцах одного типоразмера диаметром 16,05 мм (рисунок 4.13). Каждый резец был промаркирован цифрами от 1 до 4.

Согласно данным полученным от поставщика, исследованные резцы относятся к классу D, 3, (согласно таблице Е.1 «Общие технические условия СТО ИНТИ 1.100.55-2024»).

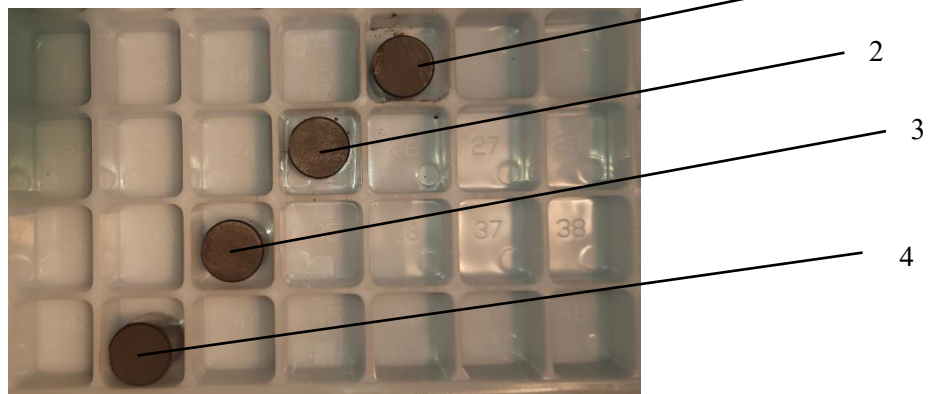


Рисунок 4.13 – Расположение и нумерация образцов PDC-резцов

Все резцы прошли процедуру нагрева и выдержки при температуре 750°C в муфельной печи с системой терморегулирования. Для полного нагрева резца его выдерживали в печи из расчета 15 секунд на 1 миллиметр толщины резца. Нагрев способствует выходу наружу скрытых металлургических трещин в алмазном слое, если таковые были допущены при спекании резцов. Более высокий и длительный нагрев в присутствии кислорода способен вызвать фазовое превращение (графитизацию) алмаза [85]. После нагрева изучали структуру поверхностного слоя алмазных резцов с помощью электронного микроскопа JEOL JSM – 6390A.

В процессе данной подготовительной операции на поверхности резцов не были выявлены технологические дефекты (микротрещины, сегрегации и др.), что свидетельствует о достаточной термической стойкости резцов в рассматриваемой партии.

4.5 Исследование качества PDC-резцов по критерию стойкости к поверхностному разрушению.

Результаты испытаний приведены на рисунках 4.14-4.17. При всех триботехнических испытаниях температура резцов находилась в пределах $170...185^{\circ}\text{C}$.

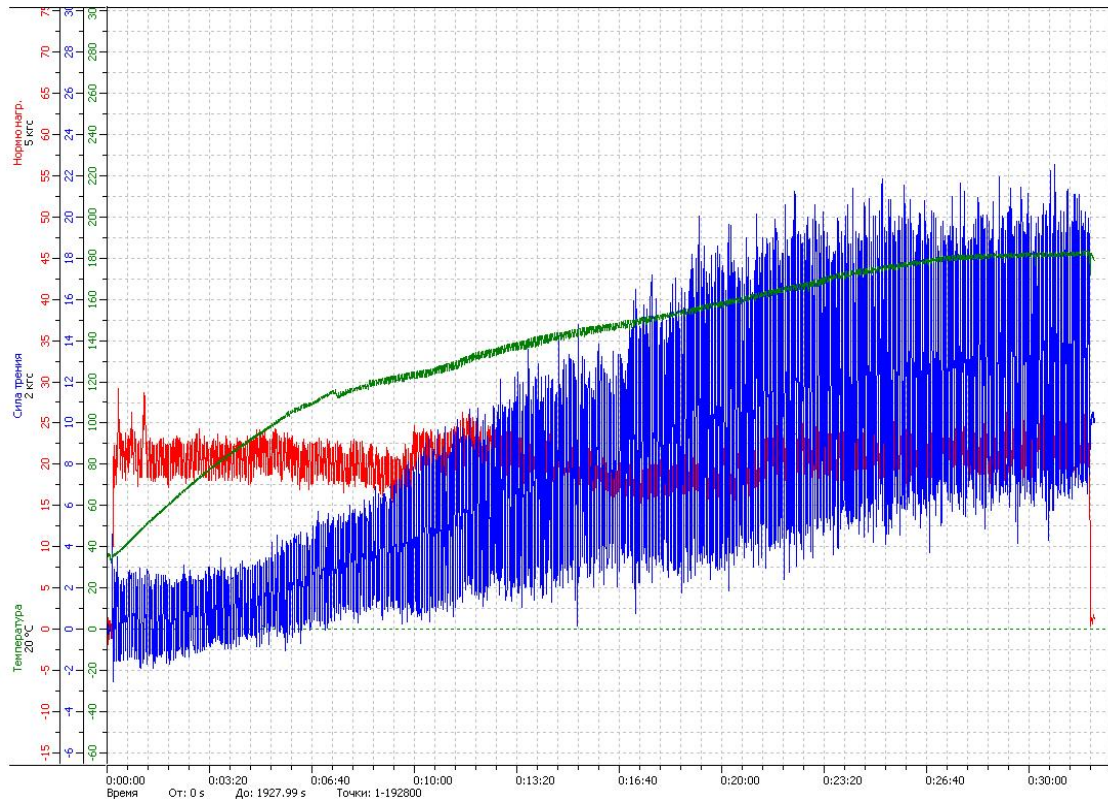


Рисунок 4.14 – Эпюры испытаний на стойкость к поверхностному разрушению образца №1 при испытаниях по схеме «кромка резца – алмазный диск»

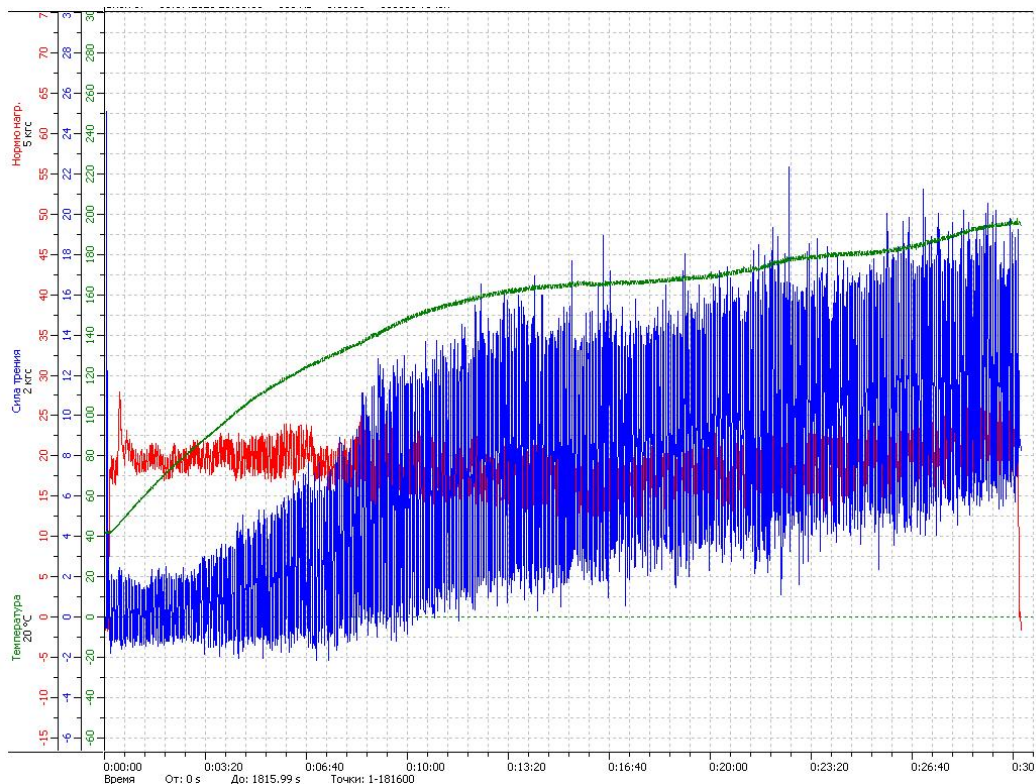


Рисунок 4.15 – Эпюры испытаний на стойкость к поверхностному разрушению образца №2 при испытаниях по схеме «кромка резца – алмазный диск»

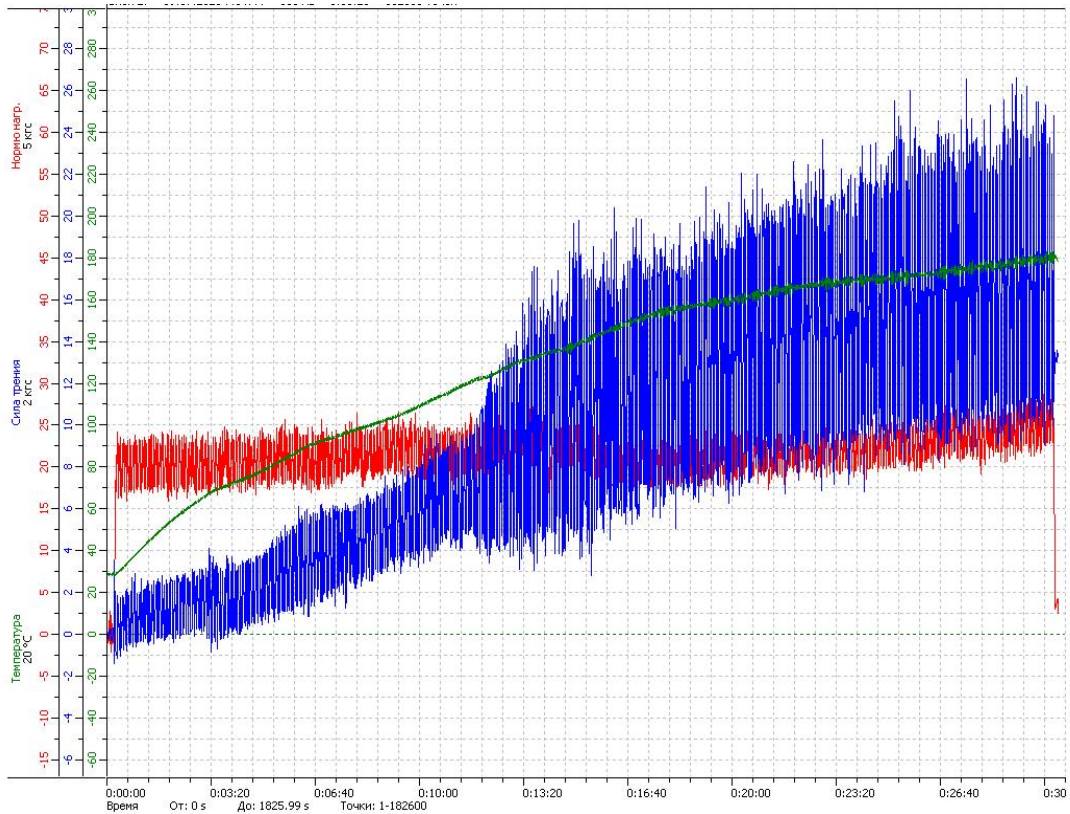


Рисунок 4.16 – Эпюры испытаний на стойкость к поверхностному разрушению образца №3 при испытаниях по схеме «кромка резца – алмазный диск»

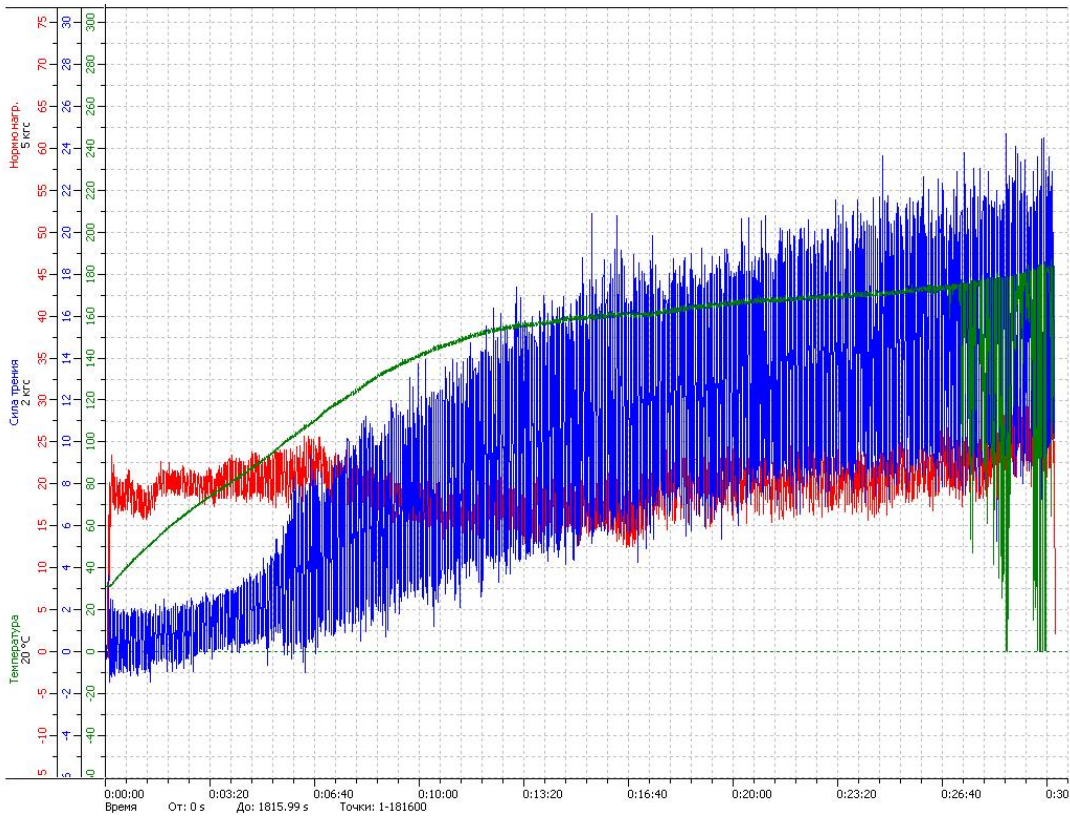


Рисунок 4.17 – Эпюры испытаний на стойкость к поверхностному разрушению образца №4 при испытаниях по схеме «кромка резца – алмазный диск»

Стойкость резцов к поверхностному разрушению оценивали по величине весового разрушения. Для этого каждый образец взвешивали до и после наработки на машине трения. Точность взвешивания составляла $\pm 0,00005$ г (аналитические весы). На основе полученных данных о начальной и конечной массе испытанных образцов рассчитывали скорость весового разрушения резцов. Все четыре резца показали скорость разрушения, равную в среднем 12 ± 1 мг/час.

Сила трения, характеризующая работу, совершаемую резцов при трении, для всех образцов составляла в среднем 80...110 Н.

Приведенные эпюры испытаний (рисунки 4.14-4.17) при сертификационных испытаниях не только показывают, что условия испытаний были идентичными (величина нормальной нагрузки, длительность испытаний), но и доказывают, что в процессе трения резцов о металл-алмазный «забой» возникают существенные крутильные колебания амплитудой до 30%, что приближает условия трения к условиям работы резца на забое. Также по эпюре нормальной нагрузки можно увидеть, что при трении возникают осевые колебания амплитудой до 25%. На полученных эпюрах можно видеть, что в процессе испытаний происходит рост величины силы трения в следствие увеличение площади контакта резца с алмазным отрезным диском и вскрытии алмазов в алмазосодержащем ободке. Такой характер эпюры силы трения является нормальным и является признаком корректно проведенного эксперимента.

4.6 Фрактографические исследования разрушенной поверхности резцов при лабораторных испытаниях

Для обоснования адекватности разработанной методики испытаний PDC-резцов при трении о металл-алмазный «забой» необходимо доказать, что при лабораторных испытаниях сохраняется вышеописанный механизм повреждаемости поверхностных слоев как и при эксплуатации на забое. Для этого были проведены фрактографические исследования поверхности трения резцов. Результаты исследования структуры изношенной поверхности PDC-резцов приведены на рисунке 4.18.

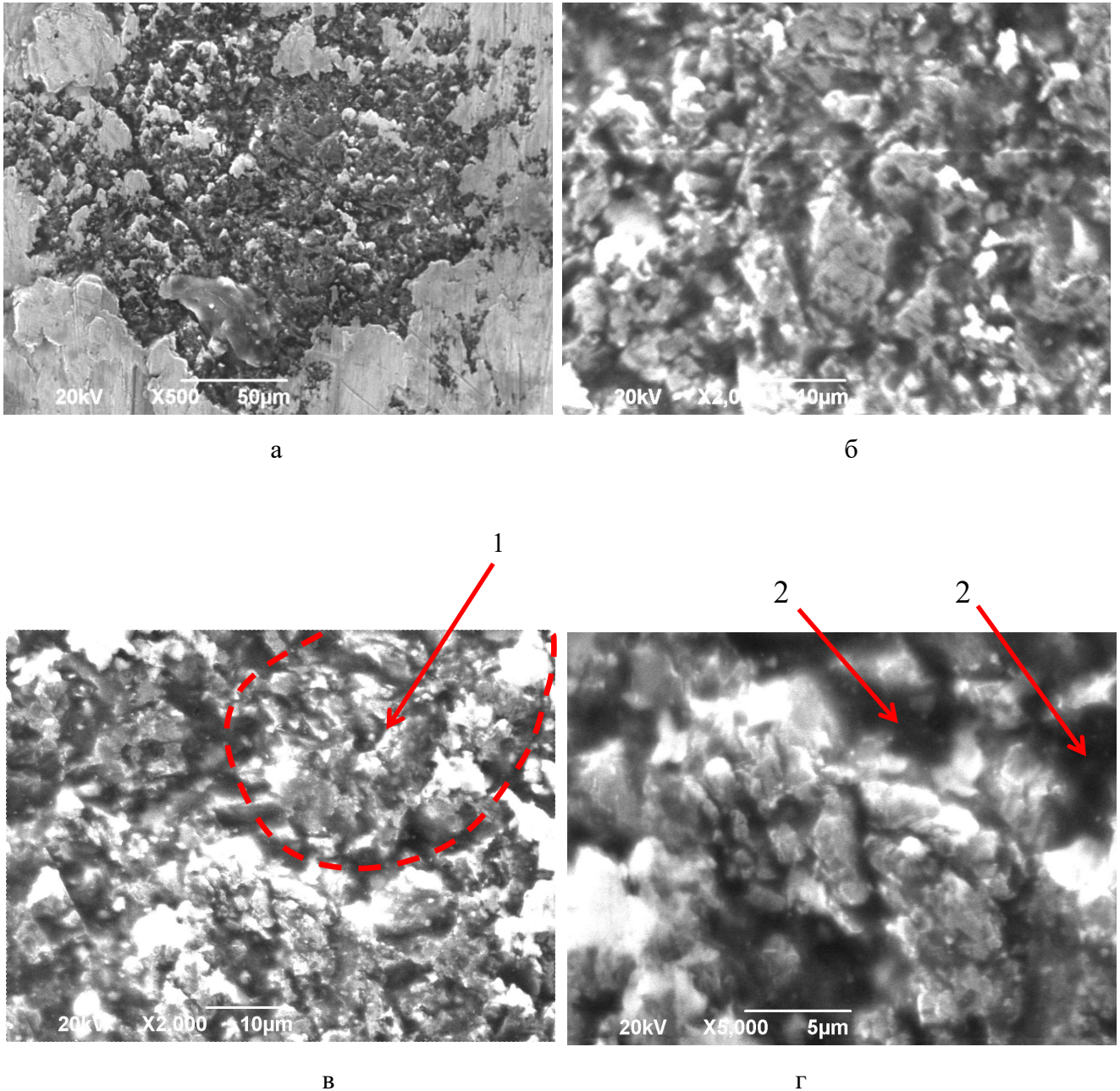


Рисунок 4.18 – Фрактографические исследования изношенной поверхности PDC-резца при трении о металл–алмазный «забой» при увеличении: $\times 500$ (а), $\times 2000$ (б, в), $\times 5000$ (г): 1– канавочная субструктура, 2– ямочная субструктура

На фотографиях можно видеть покрытые трещинами фрагменты алмазных зерен, дробящиеся до величины < 5 мкм. Наблюдаются более широкие и заметные трещины на границах зерен. Более узкие трещины внутри зерен говорят о более позднем их образовании. Такая картина показывает, что поверхностное разрушение происходит в результате постепенного накопления повреждений на границах зерен и далее внутри зерен с отделением материала по краям

образовавшихся трещин [114, 115]. Но не на любой стадии разрушения зерен трещины видны как характерные полосы на кристаллах. На поздних стадиях разрушения с краев трещины отделяются фрагменты, и происходит слияние трещин с образованием характерных субструктур в виде ямок и канавок (рисунок 4.18). Таким образом, механизмы разрушения поликристаллической алмазной пластины в лабораторных условиях и при эксплуатации идентичны, что доказывает адекватность получаемых результатов. Единственным отличием на фрактограммах, полученных в лабораторных условиях, является наличие на разрушенной поверхности следов переноса железа с поверхности контртела (светлые участки на рисунке 4.18 а), которые при трении легко отделяются и не препятствуют разрушению алмазной кромки резца.

4.7 Выводы по 4-й главе

1. Было разработано специализированное лабораторное оборудование для оценки стойкости PDC-резцов к поверхностному разрушению. Для ускорения испытаний на поверхностное разрушение предложено использовать в качестве контртела алмазный отрезной диск. В отличие от использования натуральных пород (гранитного камня), которые могут иметь существенные расхождения в твердости (6,5-7 ед. по шкале Мооса) и пределе прочности (от 40 до 80 МПа) искусственно созданный алмазный инструмент изготавливается по принятым техническим условиям и имеет регламентированный разброс свойств.

2. Установлено, что оптимальная нагрузка на фрикционный контакт составляет 196,2 Н. Более высокие нагрузки приводят к появлению очагов схватывания PDC-резца с алмазным ободом, сильному разогреву контакта (свыше 300°С), а также быстрому выходу из строя алмазного круга без возможности его вторичного использования. Рекомендуемая максимальная скорость вращения круга 200 об/мин. Меньшие нагрузки приводят к необходимости увеличения длительности испытания для формирования заметного износа.

3. Полученные результаты показывают, что разработанные методика испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению и оборудование могут использоваться для разделения резцов по стойкости к

поверхностному разрушению на этапе входного контроля их качества.

4. Фрактограммы разрушенных поверхностей резцов, полученные в условиях эксплуатации на забое и в ходе лабораторных испытаний показали, что в обоих случаях физический механизм разрушения поликристаллической алмазной пластины является идентичным и описывается концепцией усталостным характером постепенного накопления повреждений по границам и внутри алмазных зерен.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ СТОЙКОСТИ PDC-РЕЗЦОВ К ПОВЕРХНОСТНОМУ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Наличие экспериментальных методов и приборов для проведения испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению позволяет сравнивать их стойкость к изнашиванию, но не характеризует показатель их качества между собой. В данной главе представлены критерии ранжирования резцов по четырем группам износостойкости основанные на максимальных и минимальных пределах скорости разрушения резцов относящихся к различным классам.

5.1 Ранжировочные испытания для оценки критериев классификации резцов, распределенных по эксплуатационным группам в соответствии со стойкостью к поверхностному разрушению

Для испытаний были взяты по пять образцов из четырех партий PDC-резцов одного типоразмера, различающихся по странам-производителям, эксплуатационным свойствам, технологии и качеству изготовления, промаркированных индустриальным партнером следующим образом: 1) «Class 1»; 2) «Royal class»; 3) «Class A»; 4) «Class B». Согласно данным полученным от поставщика, исследованные резцы относятся к следующим классам: «Class 1» — класс A,2; «Royal class» — класс A,3; «Class A» — класс C,2; «Class B» — класс D,3, (согласно таблице Е.1 «Общие технические условия СТО ИНТИ 1.100.55-2024»).

Резцы «Class 1» отличались от других партий полированной поверхностью поликристаллической алмазной вставки.

5.2 Металлографические исследования PDC-резцов

Все резцы в состоянии поставки прошли металлографические исследования по оценке структуры и химического состава поликристаллической алмазной

пластины. Целью данных испытаний является проверка возможности ранжирования различных партий резцов на уровне микроструктуры. Подобные исследования также помогают выявлять возможные технологические дефекты (микротрещины, сегрегации и др.) в исходном состоянии, чтобы сформировать базу для последующего сравнительного анализа структуры этих же резцов после испытаний на термическую стойкость.

Структуру поверхностного слоя PDC-резцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM – 6390A. Химический состав отдельных участков режущей пластины PDC-резцов оценивали с помощью рентгеноспектрального микроанализа. Результаты исследований приведены на рисунках 5.1-5.8 и таблице 5.1.

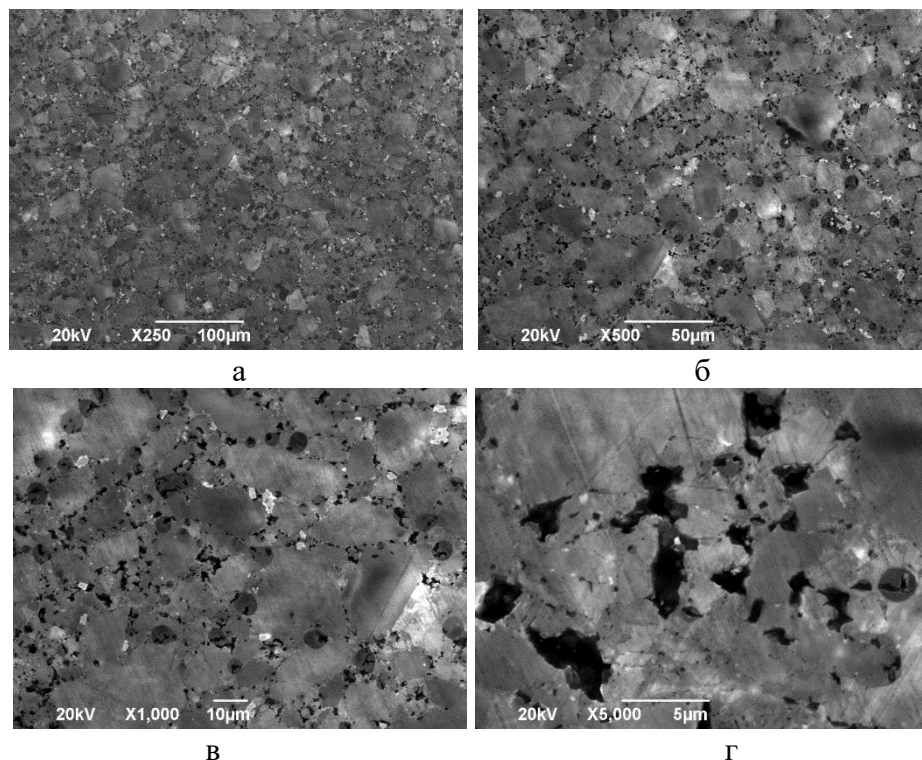


Рисунок 5.1 –Микроструктура поверхности алмазной пластины PDC-резцов «Class 1» при различных увеличениях: а) $\times 250$; б) $\times 500$; в) $\times 1000$; г) $\times 5000$

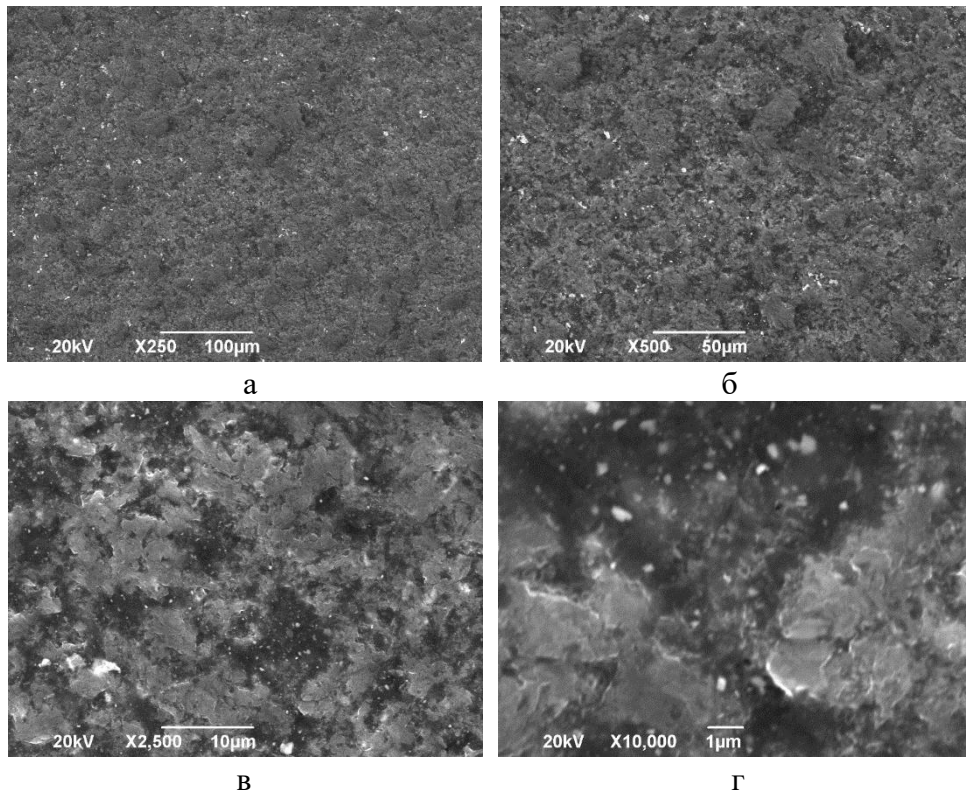


Рисунок 5.2 – Микроструктура поверхности алмазной пластины PDC-резцов «Royal class» при различных увеличениях: а) $\times 250$; б) $\times 500$; в) $\times 2500$; г) $\times 10000$

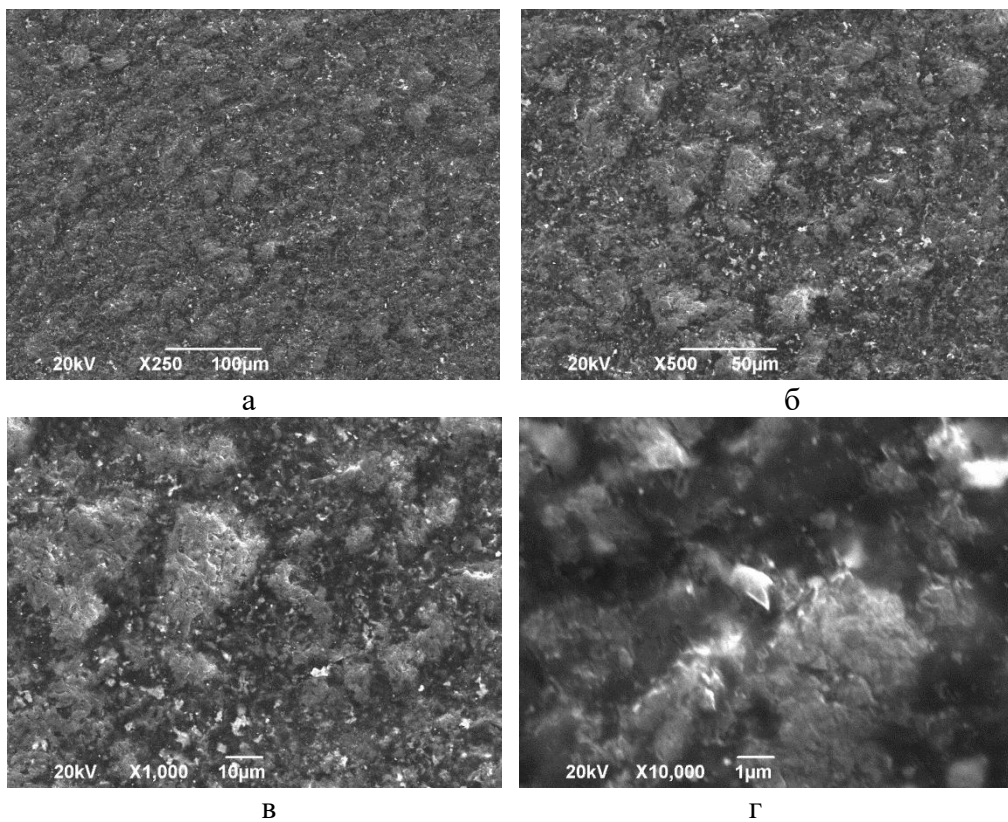


Рисунок 5.3 – Микроструктура поверхности алмазной пластины PDC-резцов «Class A» при различных увеличениях: а) $\times 250$; б) $\times 500$; в) $\times 1000$; г) $\times 10000$

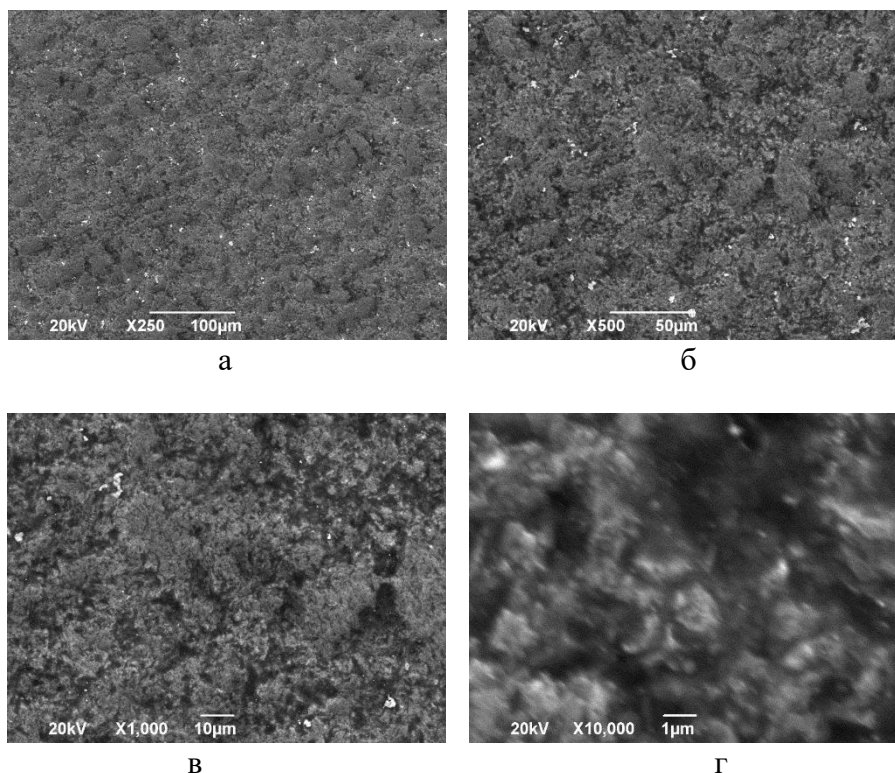


Рисунок 5.4 – Микроструктура поверхности алмазной пластины PDC-резцов «Class B» при различных увеличениях: а) $\times 250$; б) $\times 500$; в) $\times 1000$; г) $\times 10000$

Таблица 5.1 – Результаты анализа элементного состава поверхности PDC-резцов классов: «Class 1», «Royal class», «Class A», «Class B»

Элемент	«Class 1», Масс. %	«Royal class», Масс.%	«Class A», Масс. %	«Class B», Масс. %
C	93.90	90.78	87.59	91.01
O	4.55	5.71	7.91	5.25
Co	0.68	1.99	3.07	2.29
W	0.87	1.52	1.44	1.45

Из представленных результатов видно, что исследуемые резцы различаются по структуре и химическому составу. Наиболее заметные структурные отличия имеют резцы «Class 1». Полированная поверхность и множество пор, в которых до процедуры выщелачивания находился кобальт, позволяют четко разглядеть структуру поликристаллической алмазной пластины. Практически вся поверхность резцов данного класса представляет собой поликристаллический алмаз, состоящий из зерен размером около 30 мкм. При этом поры между частицами данной фракции заполнены алмазными частицами более высокодисперсных фракций. На фотографиях (рисунок 5.1 г) в порах видны

частицы размером 1...5 мкм. Такие частицы создают эффект «сплошного тела» с малым количеством пор. Технологии выщелачивания резцов и заполнения пор «алмазной пылью», как известно, используют для повышения прочности резцов в условиях высоких нагрузок и температур и соответствуют резцам самого высокого качества. Необходимость удаления кобальтовой связки обусловлена тем, что кобальт имеет более высокие значения термического расширения, чем алмаз и при нагреве резца может создавать внутренние напряжения, ухудшающие эксплуатационные свойства алмазной пластины.

Структуры резцов из остальных партий не имели заметных отличий между собой. Все выступающие части образованы алмазными частицами размером около 30 мкм. Поры между частицами заполнены кобальтом. На фотографиях PDC-резцов «Royalclass» наблюдается большее количество граней выходящих наружу алмазных частиц, что обусловлено заметно меньшим содержанием кобальта в материале.

Различия в химическом составе определяются в основном содержанием кобальтовой связки. PDC-резцам «Class 1» соответствует содержание кобальта (в весовых долях) 0,68%; резцам «Royalclass» - соответственно 1,89%; резцам «Class A» - 3,07%; «Class B» - 2,29%. Низкое содержание связки в резцах «Class 1» подтверждает, что они были подвергнуты операции выщелачивания. Кроме кобальта во всех резцах присутствует вольфрам в пределах 1,45...1,77%. Наличие кислорода показывает, что металлы на поверхности находятся в виде оксидов.

5.3 Исследование влияние циклических температурных воздействий на стойкость PDC-резцов к поверхностному разрушению

Как следует из обзорной части, технология сборки долот предусматривает нагрев резцов в процессе операции пайки, а также при перепайке резцов в ходе ремонтных работ. Поскольку имеются работы, авторы которых отмечают деструктивное воздействие температуры в присутствии кобальтовой связки на прочность PDC-пластин из-за термического расширения кобальта и создания напряжения между алмазными зернами, в данной работе были проведены

исследования влияния циклических температурных нагрузок на стойкость к поверхностному разрушению PDC-пластин [72, 86].

Испытания проводились по следующим этапам:

1. На резцах из одной партии проводят исследования микроструктуры и химического состава.
2. Проводят испытания резцов на стойкость к поверхностному разрушению по разработанной методике.
3. Проводят циклический нагрев всех резцов до температуры 750 °С, имитирующей термическое воздействие на резцы во время технологической операции их лужения и пайки латунными и серебряными припоями.
4. Проводят повторные исследования микроструктуры, элементного состава и стойкости к поверхностному разрушению.

Для сравнения механических свойств PDC-резцов до и после термоциклических испытаний на одних и тех же резцах провели оценку микроструктуры, химического состава и скорости изнашивания. Установлено, что нагрев практически не изменяет химический состав PDC-пластин, массовое содержание вольфрама меняется от 0,29 % и до 0,21 % масс., массовое содержание кобальта меняется от 0,41 и до 0,69 % масс (таблица 5.2). Исследование микроструктуры не выявило появление новых дефектов и других изменений (рисунок 5.5).

Таблица 5.2 – Анализ химического состава PDC-пластины до и после нагрева до 750 °С

Элемент	Масс. % (до нагрева)	Масс. % (после нагрева 750 °С)
C	93.45	92.38
O	5.85	6.73
Co	0.41	0.69
W	0.29	0.21

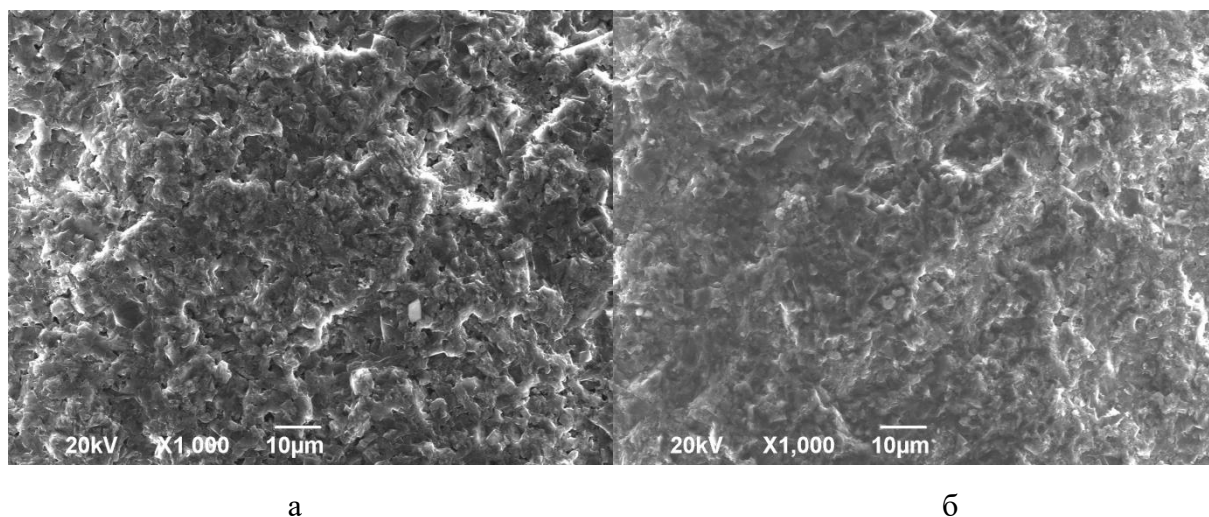


Рисунок 5.5 – Микроструктура PDC-пластины до нагрева (а) и после нагрева до 750 °С (б)

1.4 Исследование качества PDC-резцов по критерию стойкости к поверхностному разрушению

Апробация разработка методики для оценки адекватности результатов испытаний проводилась на различных партиях резцов с различными характеристиками качества. В сводной таблице 5.3 приведены результаты данных исследований, из которых видно, что испытания резцов по разработанной методике качественно отражают заявленные производителем характеристики резцов. Однако имеет место случай, когда заявленные характеристики PDC-резцов не соответствуют ожидаемым результатам, что подтверждает возможность применения данной методики для сертификационных испытаний.

Таблица 5.3 Испытания PDC-резцов различных классов

Тип резца	Средняя скорость разрушения резца, мг/час
GP-3 R1613- для пород мягких и средней твердости	11,75 ±1,8
1613ДМ2-П- для разрушения пород средней твердости	9,75 ±0,65

Продолжение таблицы 5.3

1313ДМ2- для разрушения пород средней твердости	9,25 ±0,65
13х13 S(1)- для разрушения мягких и средне-мягких пород	6,92 ±0,36
PDC GTS 1313, класс 2- для разрушения мягких и средних пород	6,3 ±0,7
PDC GTI 1313, класс 2- для разрушения пород средней твердости	6 ±0,1

Испытания на стойкость к поверхностному разрушению резцов «Class 1», «Royal class», «Class A» и «Class B» проводились по усовершенствованной методике. Их результаты представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты оценки установившихся значений силы трения и температуры испытаний на стойкость к поверхностному разрушению при испытаниях по схеме «кромка резца – алмазный диск»

Номер и партия PDC-резца	Сила трения, Н	Температура, °С
№1, «Class 1»	140 ±20	85
№2, «Class 1»	100 ±10	65
№3, «Class 1»	140 ±60	85
№4, «Class 1»	180 ±80	25
№5, «Class 1»	180 ±80	80
№ 1, «Royal class»	170 ±40	92
№2, «Royal class»	40 ±10	50
№3, «Royal class»	150 ±40	100
№4, «Royal class»	160 ±40	80
№5, «Royal class»	80 ±20	75
№1, «Class A»	110 ±30	80
№2, «Class A»	110 ±50	75
№3, «Class A»	100 ±50	85

Продолжение таблицы 5.4

№4, «Class A»	170 ±110	45
№5, «Class A»	150 ±90	70
№1, «Class B»	30 ±10	50
№2, «Class B»	120 ±30	80
№3, «Class B»	190 ±100	90
№4, «Class B»	120 ±60	85
№5, «Class B»	100 ±60	40

*Данные были получены непосредственно в ходе испытаний на эпюрах силы трения и температуры, собранные системой сбора данных с частотой 100 Гц

В ходе испытаний производилась оценка весового разрушения, как образца – резца, так и контртела – алмазного отрезного круга. Для этого образец и контрообразец взвешивали до и после наработки на машине трения. Точность взвешивания составляла: для диска: $\pm 0,01$ г, для резца: $\pm 0,00005$ г. На основе полученных данных после испытаний рассчитывали скорость весового разрушения резца и алмазного диска. Результаты расчетов сведены в таблицу 5.5.

Сила трения, характеризующая работу, совершаемую резцом при трении для всех партий составляла в среднем 80...110 Н. Скорость разрушения резца характеризует его стойкость к поверхностному разрушению и, соответственно, ресурс долота при эксплуатации в абразивных средах. Наибольшее весовое разрушение соответствовало резцам «Class 1» (средняя скорость разрушения резцов 9,35 мг/час). Меньшую скорость разрушения показали резцы из других партий, например, для резцов «Royal class» средняя скорость весового разрушения составила 4,18 мг/час, для резцов «Class B» – 4 мг/час, а для резцов «Class A» – 3,22 мг/час.

Скорость изнашивания контртела характеризует степень агрессивности резца по отношению к забою. Более агрессивными к металлическому забою оказались PDC резцы с меньшим содержанием пластичной кобальтовой связки, а именно резцы «Class 1» (средняя скорость разрушения забоя 5,82 г/час), что связано с наличием на поверхности PDC-пластины алмазных частиц с острыми кромками, не покрытых связкой – пластичным кобальтом. Существенно меньше изнашивают «забой» резцы с повышенным содержанием кобальта, так для резцов

«Royal class» наблюдалась скорость 3,55 г/час, для резцов «Class B» – 1,99 г/час, для резцов «Class A» – 2,07 г/час.

Интересен также комплексный параметр, характеризующий эффективность реза при трении – количество снятого забоя (в мг), приходящаяся на 1 мг весового разрушения режущей кромки резца. Этот безразмерный показатель составил для резцов «Class 1» величину 622, для резцов «Royal class» – 849, для резцов «Class B» – 498, а для резцов «Class A» – 643. Полученные данные, сведенные в таблицу 5.1, позволяют разработать критерии для классификации партий резцов по показателю стойкости к поверхностному разрушению (таблица 5.6).

Таблица 5.5 – Сводная таблица по испытаниям PDC-резцов классов: «Class1», «Royal class», «Class A», «Class B»

Тип резца	Испытания на стойкость к поверхностному разрушению	
	Средняя скорость разрушения «забоя», мг/час	Средняя скорость разрушения резца, мг/час
«Class 1»	5,82 ±2,16	9,35 ±0,9
«Royal class»	3,5±1,8	4,1 ±1,3
«Class A»	2 ±1,2	3,2 ±1,5
«Class B»	1,9 ±0,6	4,3 ±1,8

*Оценка погрешности проводилась по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95

Таблица 5.6 – Классификация PDC-резцов по стойкости к поверхностному разрушению

Группа стойкости резцов к поверхностному разрушению	Скорость разрушения резца, мг/час
1	< 2
2	≥2...<4
3	≥4...<6
4	≥6...<8

PDC резцы, не отвечающие требованиям вышеуказанных классов также могут использоваться в нефтегазовой отрасли для технологических целей (разбуривание обсадных труб для создания боковых стволов специальными фрезами, разбуривание цементных пробок, бурение неабразивных пород, не вошедших в перечень пород по классификации СТО ИНТИ 1.100.55-2024).

5.5 Исследование влияния размеров зерен к поверхностному разрушению PDC-резцов

Известно, что в сверхтвердых материалах, например, в твердых сплавах, имеется зависимость между элементами микроструктуры (размерами зерен) и их прочностными свойствами. В поликристаллических алмазах также могут использоваться алмазные зерна различных фракций, как правило, в пределах 20-40 мкм. Кроме того, поликристаллические алмазы, помимо основных фракций, содержат и более высокодисперсные фракции (алмазную пыль), которые при спекании заполняют пространство между основными зернами. Делается это с целью уменьшить долю кобальта в поликристалле и увеличить долю углеродных связей между алмазными частицами.

В данной работе принимается допущение о том, что размеры высокодисперсных фракций существенного влияния на прочностные свойства PDC-пластин не оказывают, поскольку исследования показали, что их размеры не меняются и находятся в среднем диапазоне 1-5 мкм. Для данных исследований были отобраны партии PDC-резцов, в которых химический анализ показал приблизительно одинаковое содержание кобальта и вольфрама, для того чтобы на результаты исследований не влияла концентрация металлических связок.

Перед исследованиями шлифовался и протравливался локальный участок

PDC-пластины. Данная подготовка необходима, поскольку поверхность PDC-пластины в состоянии поставки покрыта слоем кобальта, и выявлять размеры зерен в этом случае проблематично.

Размеры алмазных зерен определяли по ГОСТ 5639-82 методом измерения длин хорд. Выбор данного метода обусловлен тем, что структура поликристаллических алмазов содержат алмазы разных фракций, как было указано выше. Исследования проводили на изображениях полученных на электронном микроскопе с увеличением 500х, при котором изображение содержит более 50 зерен алмазов основной фракции. Алмазы мелких фракций используемые для заполнения пространства между частицами основных фракций при анализе не учитывали. Измерение проводили в 5-ти наиболее типичных полях зрения вдоль трех прямых в произвольном направлении. Полученный результат усредняли и оценивали абсолютную погрешность по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95.

Результаты исследований представлены на рисунке 5.6.

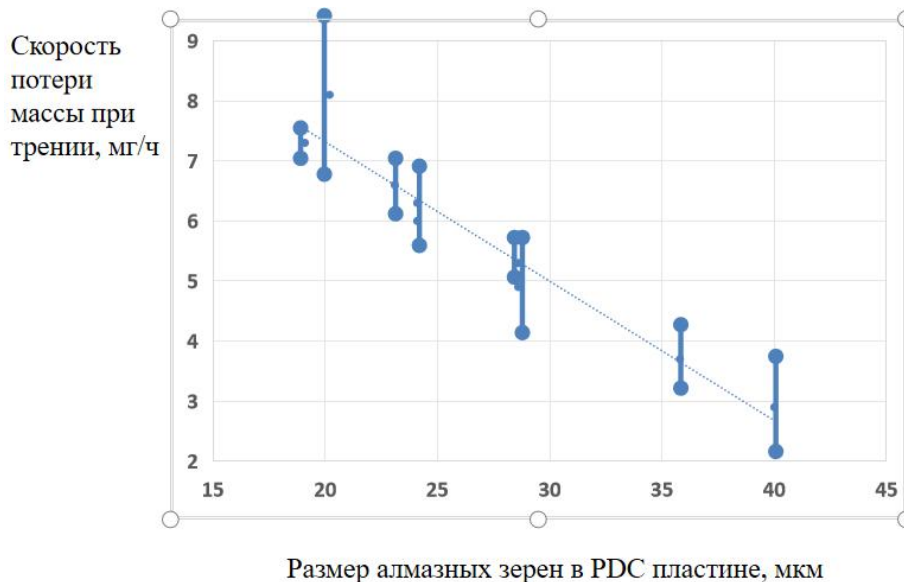


Рисунок 5.6 – Зависимость размеров алмазных зерен в составе PDC-пластин от весового износа PDC-резцов

В результате проведенного исследования была установлена практически линейная зависимость между размерами алмазных зерен и стойкостью к поверхностному разрушению, или обратно пропорциональная зависимость между

размерами зерен и скоростью весового изнашивания. Это можно объяснить тем, что, как было установлено в процессе фрактографических исследований, имеется закономерная последовательность поверхностного разрушения PDC-пластин при трении, а именно: на первом этапе идет фрагментация алмазных зерен за счет появления трещин. При этом потеря массы ещё не возникает. Далее начинается процесс скалывания кромок трещин и кромок границ зерен, что постепенно приводит к ямочному и канавочному характеру разрушения. На данном этапе потеря массы должна быть пропорциональна общей длине границ зерен и сети трещин. Поэтому скорость разрушения PDC-пластин с малым размером алмазных зерен дает большую длину границ зерен, где начинается процесс отделения материала от поверхности.

5.6 Анализ влияния элементного состава PDC-пластин на стойкость к поверхностному разрушению

В состав PDC-пластин помимо алмазных зерен входят и металлы-связки, которые в основном представлены кобальтом и вольфрамом. Как отмечалось в обзоре, их влияние на прочностные свойства поликристаллического алмаза до сих пор является предметом споров. Одни данные показывают, что содержание металлической связки снижает прочность материала при нагреве за счет напряжений создаваемых металлами, имеющими более высокий коэффициент теплового расширения, чем алмазные зерна [72, 116]. Другие данные указывают на снижение прочности поликристаллического алмаза после удаления металлической связки путем глубокого травления в смеси горячих кислот (выщелачивания), поскольку удаление металла создает поры, которые выступают в качестве концентраторов напряжений [86]. Кроме того, кобальт продолжает сохранять функцию металлической связки между алмазными зернами и его удаление снизит прочность поликристалла.

В данной работе проведено исследование влияния содержания вольфрама и кобальта на стойкость PDC-пластин к поверхностному разрушению. Для этого были рассмотрены резцы из 40 партий различных поставщиков. Перед

испытаниями на изнашивание на поверхности PDC-пластин определяли элементный состав материала методом рентгеноспектрального микроанализа. Содержание металлов в составе металлической связки определяли в массовых долях.

Результаты исследований приведены на рисунках 5.7-5.8. На данных рисунках совмещены: 1) гистограмма, указывающая на относительную частоту появления резцов, в которых содержание кобальта и вольфрама входит в заданный интервал; 2) среднее значение скорости поверхностного разрушения при лабораторных испытаниях данных резцов на изнашивание (точки); 3) погрешность оценки скорости поверхностного разрушения (интервал); 4) линия тренда (сплошная линия).

Гистограмма позволяет оценить наиболее и наименее типичные составы PDC-пластин по содержанию металлической связки. Показано, что наиболее типичные значения содержания кобальта лежат в пределах до 1% масс. В этот же диапазон входит и выщелоченные пластины. Линия тренда указывает, что минимальное поверхностное разрушение встречается на резцах с содержанием кобальта в пределах от 2 до 3% масс. Максимальная скорость разрушения соответствует резцам в которых содержание кобальта оказалось минимальным. Полученный результат можно объяснить тем, что отсутствие или низкое содержание кобальта действительно может способствовать разрушению пластин по вышеописанным механизмам. Повышение скорости поверхностного разрушения с увеличением содержания кобальта свыше 4% масс. можно объяснить как возможным расклинивающим действием кобальта при нагревании пластины, так и снижением прочности поликристаллического алмаза, если более прочные карбидные связи между алмазными зернами частично заменяются менее прочными связями сцепления алмазных зерен через кобальтовую связку. Таким образом, полученная зависимость позволяет согласовать обе точки зрения на влияние кобальта на прочность PDC-пластин.

Аналогичным образом было рассмотрено влияние вольфрама на стойкость к поверхностному разрушению PDC-пластин для этой же выборки резцов. Показано,

что наиболее типичные значения содержания вольфрама лежат в пределах до 0,5% масс. Установлено, что содержание вольфрама практически не влияет на скорость поверхностного разрушения PDC-пластин. Это можно объяснить тем, что вольфрам в поликристаллическом алмазе чаще всего содержится в виде карбидов на поверхности алмазных зерен, которые обладают хорошим смачиванием и сцеплением с кобальтом. Поэтому само по себе содержание вольфрама не влияет на прочность поликристалла, но избыточное содержание вольфрама в виде чистого металла будет оказывать то же действие, что и избыточное содержание кобальта. Это видно по наклону тренда вверх при концентрации вольфрама свыше 1,5 % масс.

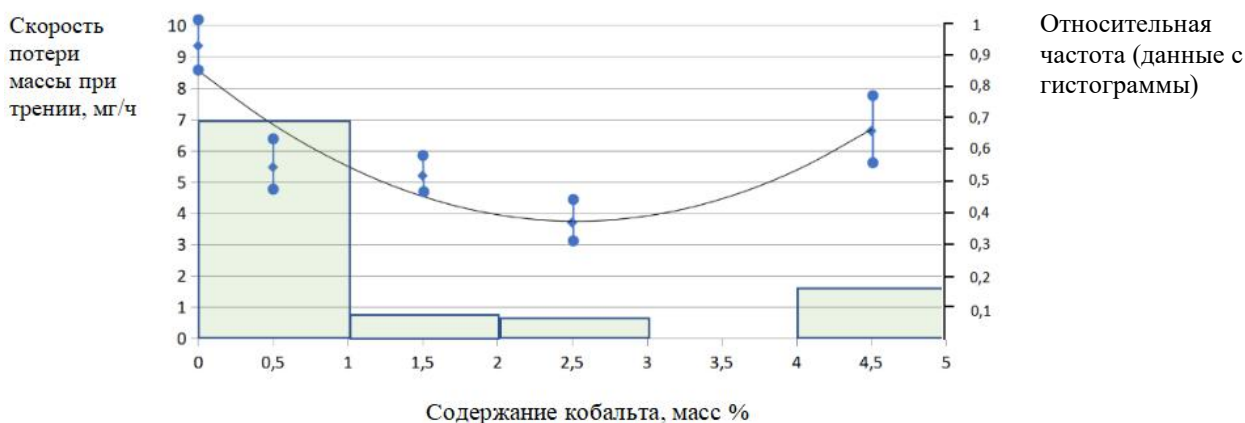


Рисунок 5.7 – Зависимость весового износа PDC-резцов от содержания кобальта в составе PDC-пластин

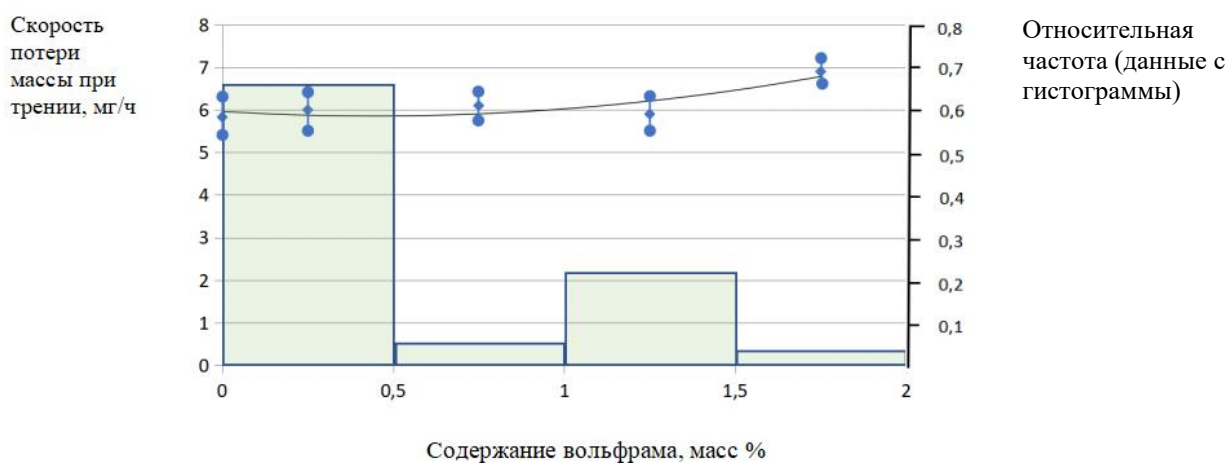


Рисунок 5.8 – Зависимость весового износа PDC-резцов от содержания вольфрама в составе PDC-пластин

5.7 Обоснование возможности применения разработанной методики для сертификационных испытаний PDC-резцов

В целях обеспечения аргументации предложенных технических решений по контролю качества PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению при трении их принято сравнивать с другими известными методами получения достоверной информации об этих свойствах. Известность научных результатов предполагает их наличие в открытой печати, доступной широкой научной общественности. Так, на сайте Алком [117] показан образец сертификата соответствия № РОСС RU.32396.04НТЦ0.ОС02.02649 на резцы из поликристаллического компакта, выданный ООО «АЛКОМ», в котором упоминается, что продукт соответствует ТУ 28.92.61-001-35596271-2023. Но в открытом доступе нет информации о содержании данных технических условий и о критериях соответствия. Также отсутствуют Российские и международные стандарты по испытаниям PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению при трении. Нет информации о существовании стандартных или эталонных образцов, которые могли бы выступить в качестве базы для сравнения. Известно, что в случае отсутствия стандартных методов сертификационных испытаний руководствуются положением ГОСТ Р 58975—2020 [], в соответствии с которым «...Выбор методик исследований (испытаний) и измерений осуществляется испытательной лабораторией с учетом пожеланий заказчика. В случае, если заказчик требует проведения исследований (испытаний) и измерений по конкретной методике исследований (испытаний) и измерений, то испытательной лаборатории следует согласиться с выбором заказчика...». Такими заказчиками в нефтегазовой отрасли являются нефтесервисные компании, доллостроительные предприятия, большинство из которых входят в состав Института нефтегазовых и технологических инициатив (ИНТИ). Так, в технических требованиях, предложенных Институтом нефтегазовых технологических инициатив (в состав ИНТИ входят свыше 100 Российских нефтегазовых компаний) содержатся рекомендации по исследованию качества резцов в нескольких редакциях.

В документе 2022 года рекомендуется методика испытаний, реализуемая на базе токарно-карусельного станка (VTL), оснащенного оснасткой для исследования процессов резания гранитного камня единичным резцом. В п.6.2.6. данного документа оговариваются следующие условия проведения испытаний: предел прочности гранита 150...250 МПа; наличие охлаждения смазывающе-охлаждающей жидкостью; фиксированная частота вращения – 40...80 об/мин; глубина резания – 0,25...1,0 мм. Результат испытания оценивается по объему изношенного слоя испытанного резца. Однако аналогичный документ ИНТИ в редакции 2024 года рекомендует для оценки абразивной стойкости PDC-резцов другую методику, в которой появились четыре класса стойкости к абразивному износу, определяемые по скорости весового изнашивания (мг/30 мин).

Испытания по новой методике рекомендуется проводить с применением алмазного инструмента (12A2-45), который по геометрии алмазного слоя и фракции алмазных частиц близок к использованным в настоящей диссертации отрезным алмазным кругам. Отличие заключается только в связующем алмазы материале: в предлагаемом ИНТИ методе связкой является смесь бакелита с железом; в исследованиях проведенных в данной диссертационной работе – более прочная, стальная связка, которая, как было отмечено выше, создает несколько более форсированные условия для поверхностного разрушения поликристаллической алмазной пластины, что объясняет более высокие значения скорости изнашивания резцов в классификации приведенной в данной диссертации. Разработанную в настоящей диссертационной работе методику испытаний PDC-резцов с методикой, предложенной ИНТИ также объединяют следующие условия испытаний: условие сухого трения; комнатная температура испытаний; количество отбираемых для испытаний резцов (3 шт. из партии); оборудование для оценки степени износа (аналитические весы) и точность взвешивания ($\pm 0,00005$ г.); наличие предварительного испытания на термостабильность; угол расположения испытуемого резца в оправке в 15° ; частота вращения круга 200 об/мин; длительность испытаний 30 мин. Нагрузка на резец для испытаний рекомендована 150 Н, против предложенной в диссертации

нагрузки в 200 Н, что также должно дать небольшое количественное расхождение результатов испытаний по методике ИНТИ в меньшую сторону, что и подтверждается сравнением обеих классификаций. Таким образом, практически отсутствуют существенные различия между методиками испытаний PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению при трении предложенные в данной диссертационной работе и общих технических условиях ИНТИ. При этом методика и оборудование, разработанные в ходе данных диссертационных исследований на год выпуска методики ИНТИ имеет приоритет, подтвержденный патентами, доказывающими новизну мирового уровня.

Согласно ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 для проведения сертификационных испытаний рекомендуется использовать методы, опубликованные в международных, региональных или национальных стандартах, либо рекомендованные авторитетными техническими организациями, к которым относится ИНТИ. Поскольку в последней редакции предложенный метод испытаний ИНТИ практически совпадает, с методом испытаний, приведенным в данной диссертации, то предложенные технические решения можно считать аргументированными.

Сравнивая авторскую и предложенную ИНТИ классификацию PDC-резцов по стойкости к поверхностному разрушению [118] (таблица 5.7) можно увидеть количественное совпадение границ весового изнашивания относящихся к разным классам, если привести критерий ИНТИ в стандартные единицы скорости весового изнашивания мг/ч. При этом авторская классификация была впервые разработана в ходе классификационных испытаний PDC-резцов 27 ноября 2020 года, а опубликована в статье 2024 года [106].

Таблица 5.7 –Классы стойкости к абразивному износу

Образец резца / тип, марка	Назначение	Износ, мг/час	Класс по авторской мет. табл. 5.6	Класс по СТО ИНТИ 1.100.55-2024
№1 1616 X SP	для бурения неоднородных пород	5,7 ±0,1	3	3
№2 1616 XTSP	для бурения пород средней и высокой твердости, а также в абразивных пластах	5,3 ±0,8	3	3
№3 1616 M8 SP	для бурения пород средней и высокой абразивности	4,6 ±0,75	3	3
№4 1319 ACSP	для бурения пород средней и высокой абразивности	4,2 ±1,05	3	3
0R	для бурения мягких и вязких горных пород	6 ±0,08	4	3
ZTAS-1613PZ	резцы повышенной вязкости и ударопрочности глубоко выщелоченные	3,6 ± 0,3	2	2
Резцы с CVD обработкой-премиальный сегмент	для бурения в сложных условиях (высокотемпературные скважины, абразивные пласты)	5,2 ±0,1	3	3
GP-3 R1613	для пород мягких и средней твердости	11,75 ±1,8	Вне классификации	Вне классификации
1613ДМ2-П	для пород средней твердости	9,75 ±0,65	Вне классификации	4
1313ДМ2	для пород средней твердости	9,25 ±0,65	Вне классификации	4
13x13 S(1)	для мягких и средне-мягких пород	6,92 ±0,36	4	4
PDC GTS 1313, класс 2	для мягких и средних пород	6,3 ±0,7	4	4
PDC GTI 1313, класс 2	для разрушения пород средней твердости	6 ±0,1	4	3
Class 1 класс А,2	для очень крепких абразивных пород	9,35 ±0,9	Вне классификации	4
Royal class класс А,3	для очень крепких среднеабразивных пород	4,1 ±1,3	3	3
Class А класс С,2	для пород средней крепости и высшей средней абразивности	3,2 ±1,5	2	2
Class В класс D,3	для мягких пород средней абразивности	4,3 ±1,8	3	3

Разработанные классы стойкости позволяют соотнести PDC резцы с абразивностью и крепостью горных пород, которые указаны в рекомендациях ИНТИ [118].

Обоснование разработанной методики испытаний и классификации PDC-резцов (два образца) проводили путем сравнения их качества по данным эксплуатации в составе алмазного долота 220,7 мм и лабораторных испытаний при трении о металл-алмазный «забой». Традиционно подобные испытания проводят путем лабораторных исследований новых резцов с последующей проверкой качества при эксплуатации, но учитывая специфику нефтегазовой отрасли (наличие коммерческой тайны) реализация такой методики практически невозможна. Поэтому была разработана новая методика сравнительных испытаний, которая имеет следующие особенности: 1) для лабораторных испытаний брали резцы, выпаянные из отработавшего ресурс долота с известной наработкой на отказ (проходка 1024 м) и со следами изнашивания; 2) лабораторные испытания проводили со стороны, противоположной эксплуатационному износу, т.е. на той части резца, которая не участвовала в резании породы и, соответственно, не накапливала повреждения.

В результате испытаний на трение получены скорости весового изнашивания для образца №1 – 7 мг/час, для образца №2 – 6 мг/час. По предложенной классификации стойкости резцов качество исследованных образцов соответствует самому низкому – 4 классу. Учитывая, что алмазные долота в западной Сибири имеют среднюю проходку 10 000 – 15 000 м [119] проходка данных резцов при эксплуатации является низкой, что дополнительно подтверждает результаты лабораторных испытаний.

При осуществлении деятельности по оценке соответствия PDC-резцов требованиям заказчика следует руководствоваться стандартами ГОСТ Р 51000.5-96 [121], ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [122], ГОСТ Р 58972-2020 [123] и др.

1.8 Выводы по 5-й главе

1. Проведены ранжировочные испытания резцов одного типоразмера,

различающихся по странам-производителям, эксплуатационным свойствам, технологии и качеству изготовления для выявления максимального возможного диапазона изменения скорости их поверхностного разрушения при лабораторных исследованиях. Проведенные исследования показали, что поставленные для испытаний четыре партии PDC-резцов отличаются по микроструктуре, химическому составу, прочностным и трибологическим свойствам.

2. Испытания показали, что новая методика испытаний позволяет выявлять различия в скорости разрушения с точностью до $\pm 0,2$ мг/час во всем значимом диапазоне, характерном для современных PDC-резцов, который по опыту испытаний различных партий резцов составляет от 1 до 6 мг/час. Данный диапазон был разделен на четыре группы для характеристики свойств PDC-резцов: 1) повышенной стойкости к поверхностному разрушению (со скоростью разрушения до 2 мг/час); 2) средней стойкости к поверхностному разрушению (со скоростью разрушения от 2 до 4 мг/час); 3) умеренно стойкие к поверхностному разрушению (со скоростью разрушения от 4 до 6 мг/час); 4) пониженной стойкости к поверхностному разрушению (со скоростью разрушения от 6 мг/час и выше).

3. Группы эксплуатационных свойств по стойкости к поверхностному разрушению обозначаются арабскими цифрами от 1 до 4. Максимальная износостойкость соответствует группе «1», минимальная – группе «4». Резцы группы «1» могут быть рекомендованы для бурения более абразивных пород, чем резцы, относящиеся ко второй группе и т.д. Резцы 4-ой группы могут быть рекомендованы для бурения малоабразивных пород (известняк, каменная соль, апатит, сульфидные руды, мягкие сланцы), либо вовсе отклонены от сборки долота по причине низкой стойкости к поверхностному разрушению.

4. Проведены металлографические исследования по выявлению закономерности влияния размеров алмазных зерен на стойкость к поверхностному разрушению. Установлено, что с увеличением алмазных зерен происходит линейное уменьшение скорости потери массы PDC-пластины при трении.

5. Проведены металлографические исследования по выявлению закономерности влияния металлической связки (вольфрама и кобальта) на стойкость PDC-пластины к поверхностному разрушению при трении. Установлено, что содержание вольфрама в концентрациях до 1,55 % масс. практически не влияет на скорость поверхностного разрушения PDC-пластин, а минимальное поверхностное разрушение PDC-пластин наблюдается на резцах с содержанием кобальта в пределах от 2 до 3% масс.

6. Предложенная в данной диссертационной работе методика оценки стойкости PDC-резцов к поверхностному разрушению при трении может быть рекомендована к использованию в промышленности для проведения сертификационных испытаний для оценки абразивной стойкости PDC-резцов, а также ранжированию их по классам стойкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены закономерности поверхностного разрушения PDC-резцов при эксплуатации. На основе фрактографического анализа рабочих поверхностей резцов выявлен усталостный механизм повреждаемости поликристаллических алмазных пластин, возникающий за счёт накопления дефектов (трещин) в алмазных зёрнах. Поверхностное разрушение идентифицировано как контактная усталость. Исследования позволили выявить шесть характерных субструктур поверхностного разрушения: полосчатая, каменистая, ступенчатая, серповидная, ямочная и канавочная, наличие которых может быть использовано для обоснования лабораторных исследований.

2. Изучено влияние концентрации металлической связки (вольфрама – до 1,55% масс. и кобальта – до 4,63% масс.) на стойкость PDC-пластин к поверхностному разрушению. Установлено, что вольфрам в исследованном диапазоне оказывает слабое влияние на стойкость пластин к поверхностному разрушению. Минимальное поверхностное разрушение PDC-пластин наблюдается на резцах с содержанием кобальта в пределах от 2 до 3% масс.

3. Проведены микроструктурные исследования по выявлению закономерности влияния размеров алмазных зёрен (в диапазоне от 5 до 40 мкм) на стойкость к поверхностному разрушению. Установлено, что с увеличением размеров алмазных зёрен от 19 до 40 мкм наблюдается монотонный рост стойкости PDC-пластины к поверхностному разрушению.

4. Разработан материаловедческий критерий оценки предельного состояния поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов по степени поверхностного разрушения рабочих кромок с учетом твердости разбуриваемой породы. Установленные значения твердости кварцита и гранита позволили обосновать применение алмазного отрезного диска в качестве металлоалмазного контртела при испытаниях стойкости материала к поверхностному разрушению.

5. Разработаны методика и специализированное оборудование для лабораторных испытаний и контроля эксплуатационных свойств поликристаллических алмазных пластин PDC-резцов по критерию стойкости к

поверхностному разрушению. Методика реализуется при нормальной нагрузке 200 Н, частоте вращения контртела 200 об/мин, длительности испытаний 30 мин и угле установки резца 15° к контртелу. Целесообразность практического использования разработанной методики и специализированного устройства для испытания PDC-резцов на поверхностное разрушение подтверждается актом об использовании результатов диссертационной работы компаниями ООО «РН-Сервис» и ООО «Химбурсервис».

6. На основе скорости весового изнашивания поликристаллических алмазных пластин разработаны критерии ранжирования PDC-резцов по стойкости к поверхностному разрушению и предложены четыре группы стойкости, предназначенные для сертификационных, сравнительных и приемочных испытаний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Vynohradova, O. P. Сравнительная оценка эффективности буровых долот с алмазосодержащей матрицей и вставками из композитов на основе алмаза / O. P. Vynohradova, A. P. Zakora, A. A. Shul'zhenko, V. G. Gargin // *Journal of Superhard Materials*. – 2022. – Vol. 44, № 1. – P. 57–61. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457622010099>.
2. Ropyak, L. Ya. Analysis of materials and modern technologies for PDC drill bit manufacturing / L. Ya. Ropyak, T. O. Pryhorovska, K. H. Levchuk // *Progress in Physics of Metals*. – 2020. – Vol. 21, № 2. – P. 274–301. – DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.21.02.274>.
3. ГОСТ 13297-86. Резцы и вставки алмазные. Технические условия. – Введ. 01.01.1988. – Москва : Изд-во стандартов, 1986. – 14 с.
4. ГОСТ 26474-85. Долота и головки бурильные алмазные и оснащенные сверхтвердыми композиционными материалами. Типы и основные размеры. – Введ. 01.07.1986. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 52 с.
5. ГОСТ Р 71166-2023. Долота и головки бурильные алмазные и оснащенные сверхтвердыми композиционными материалами. Типы и основные размеры. – Введ. 01.03.2024. – Москва : Стандартинформ, 2023. – 58 с.
6. Зыбинский, П. В. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении : монография / П. В. Зыбинский, Р. К. Богданов, А. П. Загора, А. М. Исонкин. – Донецк : Норд-Пресс, 2007. – 244 с.
7. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом : монография / В. В. Нескоромных, М. С. Попова, Лю Баочанг. – Красноярск : СФУ, 2020. – 268 с.
8. Третьяк, А. Я. Инновационные подходы к проектированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А. Я. Третьяк, В. В. Попов, А. Н. Гроссу, К. А. Борисов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
9. Zhao, S. Tribological behavior of PDC-cutter including cemented carbide and

- polycrystalline diamond composites produced by HPHT for drilling applications / S. Zhao, C. Li, D. Davoodi, H. M. Soltani, M. Tayebi // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2024. – Vol. 123. – Article 106756. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106756.
10. Некрасов, И. Н. Буровое долото с поликристаллическими алмазными элементами : пат. RU 2377384 C1 / И. Н. Некрасов, Р. М. Богомолов, А. Г. Ищук [и др.] ; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.
 11. Shen, Y. Cutter having shaped working surface with varying edge chamfer : U.S. Patent 8739904 B2 / Y. Shen, Y. Zhang, S. S. Kristiansen ; publ. 27.05.2014.
 12. Schlumberger (Smith Bits). PDC Bits [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.slb.com/drill-bits/pdc-bits> (дата обращения: 14.04.2025).
 13. Baker Hughes. PDC Drill Bit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.shopbakerhughes.com/products/drill-bits/pdc-drill-bit> (дата обращения: 14.04.2025).
 14. АО «Волгабурмаш». Буровые долота для нефтегазовой промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vbm.ru/ru/produktsiya/category/view/1> (дата обращения: 14.04.2025).
 15. Nenani Yalong Diamond Tools. PDC Cutters for Oil & Gas [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.yalonggroup.com/en/product_oil&gas.html (дата обращения: 14.04.2025).
 16. Трушкин, О. Б. Давление PDC-резцов на пластично-хрупкую горную породу в процессе ее разрушения / О. Б. Трушкин, Х. И. Акчурин // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 244. – С. 448–453. – DOI: 10.31897/PMI.2020.4.7.
 17. Clayton, R. New Bit Design, Cutter Technology Extend PDC Applications to Hard Rock Drilling / R. Clayton, S. Chen, G. Lefort // Paper SPE/IADC 91840 presented at the 2005 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Feb. 23-25.
 18. Abbas, R. K. Improving Drilling Efficiency by Modeling the Effects of Weight on Bit, Rotary Speed and Hydraulic Power on Rate of Penetration / R. K. Abbas // *White Rose eTheses Online*. – 2015. – 211 с.
 19. Bourgoyne, A. T. Chapter 3: Forces on Bit [Электронный ресурс] / A. T. Bourgoyne,

- F. S. Young // *Advanced Drilling and Well Technology*. – OnePetro, 2007. – Режим доступа: <https://admin.onepetro.org/books/chapter-pdf/3299690/chapter03.pdf> (дата обращения: 21.07.2025).
20. Fu, B. Drilling performance analysis of a new type of direct-rotating mixed-jet nozzle / B. Fu, S. Zhang, S. Liu, Z. Zhu // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 200. – Article 108302. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108302>.
21. Bi, G. Study on the mechanism of high-efficiency rock breaking by hydraulic jet based on explicit dynamics / G. Bi, X. Wang, F. Han [et al.] // *Processes*. – 2023. – Vol. 11, № 7. – Article 2165. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11072165>.
22. Долота лопастные режущего действия, оснащенные резцами с алмазной твердосплавной пластиной. Общие технические требования. – Санкт-Петербург : АНО «Институт нефтегазовых технологических инициатив», 2022. – 81 с.
23. Al-Dujaili, A. N. Optimizing polycrystalline diamond compact bit selection and drilling parameters for deviated wells in the Majnoon Field, Iraq / A. N. Al-Dujaili, M. S. Asad, N. Saeed, N. Tileuberdi // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – Article 3178. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87484-9>.
24. Li, Y. Failure characteristics and service life prediction of polycrystalline diamond compact (PDC) cutter under cyclic impact loading / Y. Li, Y. Zeng, Z. Chen, L. Liu // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 231, № 1. – Article 212339. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212339>.
25. Gerbaud, L. PDC Bits: All comes from the cutter rock interaction / L. Gerbaud, S. Menand, H. Sellami // *IADC/SPE Drilling Conference*, Feb 2006, Miami, United States. – P. 1-10. – DOI: 10.2118/98988-MSff.
26. Crane, D. Three-Dimensional Ridge-Shaped Diamond Element Efficiently Removes Rock, Well-Cost / D. Crane, Y. Zhang, C. Douglas [et al.] // *AADE National Technical Conference and Exhibition*, Houston, 2017. AADE-17-NTCE-035.
27. Da Costa, R. C. Selecting diamonds for drilling tools / R. C. Da Costa, A. R. Da Costa // *TRIBOBr18 Conference Poster*, 2018. – DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15710.28480>.

28. Weaver, G. E. A New PDC Cutting Structure Improves Bit Stabilization and Extends Application into Harder Rock Types / G. E. Weaver, R. I. Clayton // Paper SPE/IADC 25734 presented at the 1993 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Feb. 22-25.
29. Третьяк, А. Я. Контроль ресурса PDC-пластин бурового долота / А. Я. Третьяк, Е. В. Сидорова, Ю. Ф. Литкевич [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 8. – С. 28-35.
30. Rong, L. Optimization of functionally graded polycrystalline diamond compact based on residual stress: Numerical simulation and experimental verification / L. Rong, S. Zhang, D. Wu [et al.] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2023. – Vol. 112. – Article 106414. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106414>.
31. Sinodrills. PDC Drill Bit vs Tricone: Longer lifespan with no moving parts [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: <https://www.sinodrills.com/pdc-drill-bit/> (дата обращения: 29.06.2025).
32. ONIX. PDC-резцы с вращающейся алмазной пластиной [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.slb.ru/upload/iblock/32a/broshyura-onyx-360-dlya-1.8.3.1.3.pdf> (дата обращения: 10.04.2025).
33. Регламент эксплуатации долот: Уралбурмаш и Волгабурмаш [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://174417.selcdn.ru/VBM/PDF_RU/support_information_rus.pdf (дата обращения: 06.03.2025).
34. Шарауова, А. Б. Идентификация модели буримости и прогнозирование показателей буримости горных пород (на примере месторождения Узень) : дис. ... доктора философии / А. Б. Шарауова. – Алматы : Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, 2018. – 124 с.
35. IADC/SPE 23939 First revision to the IADC fixed cutter dull grading system. – 1992.
36. AAODC Bit Grading Manual / American Association of Oilwell Drilling Contractors. – 3rd ed. – Houston : American Association of Oilwell Drilling Contractors, 2018.
37. РД 39-2-51-78. Коды износа долот по методике ВНИИБТ.
38. Научно-производственное предприятие Буринтех [Электронный ресурс] :

- официальный сайт. – Режим доступа: <https://burintekh.ru/upload/iblock/871/r817xkl9kjc04qjl3qtt25rfp3pmf8lh.pdf> (дата обращения: 03.03.2025).
39. Борисов, К. А. Разработка методических и технологических рекомендаций по повышению эффективности бурения скважин путем предупреждения аномального износа режущих элементов долот PDC : дис. ... канд. техн. наук / К. А. Борисов. – Новочеркасск : Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, 2020. – 172 с.
 40. SPE/IADC 16146 Application of the 1987 roller bit dull grading system. – 1987.
 41. Code of bit condition // Drilling. – 1961. – Vol. 23, № 1. – P. 51–53.
 42. Clark, D. A. Application of the new IADC dull grading system for fixed cutter bits / D. A. Clark, R. B. Coolidge, J. T. Kelety, J. Kerr // SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, 1987. SPE/IADC 16145.
 43. Мясников, Я. В. Как правильно дать оценку износа долот типа PDC в промысловых условиях? [Электронный ресурс] / Я. В. Мясников, А. В. Ионенко, С. Г. Гаджиев, А. А. Липатников, Е. Г. Леонов // Сфера нефть и газ : официальный сайт. – Режим доступа: <https://сферанефтьгаз.рф/iscpetro-2014-5/> (дата обращения: 03.03.2025).
 44. Syzrantseva, K. Optimization of the damping element of axial vibrations of the drilling string by computer simulation / K. Syzrantseva, V. Arishin, M. Dvoynikov // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – № 11 (10). – P. 2312–2315.
 45. Ashrafi, S. B. Application of hybrid artificial neural networks for predicting rate of penetration (ROP): a case study from Marun oil field / S. B. Ashrafi, M. Anemangely, M. Sabah, M. J. Ameri // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 175. – P. 604–623.
 46. Ahmed, O. S. Computational intelligence-based prediction of drilling rate of penetration: a comparative study / O. S. Ahmed, A. A. Adeniran, A. Samsuri // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – № 172. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.027.
 47. Zhao, Y. A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration

- during drilling operations / Y. Zhao, A. Noorbakhsh, M. Koopialipoor, A. Azizi, M. M. Tahir // *Engineering with Computers*. – 2019. – DOI: 10.1007/s00366-019-00715-2.
48. Третьяк, А. Я. Определение поломок PDC-резцов с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования / А. Я. Третьяк, А. В. Кузнецова, К. А. Борисов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330, № 5. – С. 169-177.
49. Пятницкий, А.С. Возможности второго поколения резцов ONYX для долот PDC / А.С. Пятницкий, М. В. Жентичка // *Инженерная практика*. – 2011. – № 10. – С. 5.
50. Боснак, А. Б. Совершенствование конструкций и технологии производства PDC долот / А. Б. Боснак, Р. М. Богомолов, Ф. В. Старцев // *Вестник Ассоциации буровых подрядчиков*. – 2013. – № 3. – С. 16–19.
51. Pat. US6852414B1. Self sharpening polycrystalline diamond compact with high impact resistance. – 2002.
52. ООО «ПетроИнжиниринг». Методика улучшения соединения алмазной пластины с подложкой // *Сфера. Нефть и газ*. – 2014. – № 5. – С. 47–52.
53. Полушин, Н. И. Снижение содержания металлов в алмазном слое поликристаллов PCD методами химического и электрохимического травления / Н. И. Полушин, М. С. Овчинникова, М. Н. Сорокин // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2017. – № 2. – С. 31–38. – DOI: [dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-2-31-38](https://doi.org/10.17073/1997-308X-2017-2-31-38).
54. Chen, Zhaoran. Wear resistance and thermal stability enhancement of PDC sintered with Ti-coated diamond and cBN / Zhaoran Chen, Dejiang Ma, Shanmin Wang [et al.] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2020. – Vol. 92. – Article 105278. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105278.
55. Xu, Jianhui. Advanced coating to mitigate PDC cutter thermal degradation in PDC bit manufacturing / Jianhui Xu, Guodong David Zhan, Timothy E. Moellendick, Wenhui Jiang // *International Petroleum Technology Conference*. – 2022. – Paper IPTC-21954-MS. – DOI: 10.2523/IPTC-21954-MS.
56. World Oil Tools Review. Innovations in PDC Cutters. – Houston : World Oil Tools Review, 2023.

57. SML Tools. Standard PDC Cutter [Электронный ресурс]. – Wuhan : SML Tools. – Режим доступа: <https://www.sml-pdcbit.com/products/standard-pdc-cutter/> (дата обращения: 29.06.2025).
58. LANDS Superabrasives. Каталог продукции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.landssuperabrasives.com> (дата обращения: 14.04.2025).
59. Третьяк, А. Я. Стабилизирующая кольцевая буровая коронка : пат. RU 2577351 С1 / А. Я. Третьяк, Ю. Ф. Литкевич, О. В. Савенок, И. Г. Туровский ; опубл. 27.02.2016, Бюл. № 6.
60. Нассиф, С. Н. Разработка методики ускоренных испытаний твердосплавных зубков шарошечных долот на стойкость к ударным циклическим нагрузкам : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01, 01.02.06 / С. Н. Нассиф. – Самара, 2007. – 196 с.
61. Богомолов, Р. М. Совершенствование вооружения шарошечного бурового долота / Р. М. Богомолов, Д. Ю. Сериков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2018. – № 5. – С. 24–28.
62. Васильев, А. А. Совершенствование буровых долот различных типов / А. А. Васильев, Д. Ю. Сериков, В. Ю. Близнюков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 6. – С. 28–31.
63. DIN 50330. Prüfverfahren zur Bestimmung der Abriebfestigkeit von Werkstoffen. – Berlin : Beuth Verlag, 1982.
64. Виноградов, В. Н. Установка для испытания на абразивное изнашивание штырей одношарошечного долота / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, К. В. Грачев, А. И. Герасименко // Труды МИНХ и ГП. – Москва, 1972. – Вып. 93. – С. 142–145.
65. Галлямов, А. Р. Устройства для триботехнических испытаний : учебное пособие / А. Р. Галлямов, Р. Г. Гришин, И. Д. Ибатуллин. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 128 с.
66. ASTM G65–16(2021). Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. – West Conshohocken, PA, USA : ASTM International, 2021. – 12 p.
67. ASTM B 611–21. Standard Test Method for Determining the High-Stress Abrasion Resistance of Hard Materials. – West Conshohocken, PA, USA : ASTM International,

2021. – 7 с.
68. ASTM G 105–20. Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests. – West Conshohocken, PA, USA : ASTM International, 2020. – 10 с.
69. ГОСТ 23.207-79. Метод испытания на ударно-абразивный износ о незакрепленном абразиве. – Москва : Стандартиформ, 1979. – 20 с.
70. Пат. 2434219 С2 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Совершенствование установки для испытаний на ударно-гидроабразивный износ / Б. Г. Гасанов, П. В. Сиротин, А. Д. Ефимов [и др.] ; заявл. 15.12.2009 ; опубл. 20.11.2011.
71. ГОСТ 23.212-82. Материалы. Метод испытания на ударно-абразивное изнашивание о закрепленном абразиве при низких температурах. – Москва : Стандартиформ, 1982. – 20 с.
72. Yahiaoui, M. A study on PDC drill bits quality / M. Yahiaoui, L. Gerbaud, J-Y. Paris, J. Denape, A. Dourfaye // *Wear*. – 2013. – Vol. 298-299. – P. 32-41. – DOI: 10.1016/j.wear.2012.12.026.
73. Куфтырев, Р. Ю. Износостойкость PDC режущих элементов, применяемых для комплектации PDC буровых долот / Р. Ю. Куфтырев, Н. И. Полушин, О. С. Котельникова, А. И. Лаптев, М. Н. Сорокин // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2017. – № 9. – С. 745–751.
74. Ненашев, М. В. Технические средства и методики входного контроля качества PDC зубков алмазных буровых долот / М. В. Ненашев, И. Д. Ибатуллин, А. Н. Журавлев // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13, № 4(3). – С. 835–838.
75. Нескоромных, В. В. Разработка породоразрушающего инструмента с резцами PDC / В. В. Нескоромных, М. С. Попова, Е. В. Парахонько // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331, № 2. – С. 131–138. – DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2499.
76. Liu, Wei. Microstructure and wear of Ni-WC hardfacing used for steel-body PDC bits / Wei Liu [et al.] // *Wear*. – 2021. – Vol. 476. – Article 203646. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.203646.
77. Gerbaud, L. PDC Bits: All Comes from the Cutter-Rock Interaction / L. Gerbaud, R.

- Djebbar, S. Menand // IADC/SPE Drilling Conference Proceedings. – 2006. – SPE/IADC 98989.
78. Wu, F. A novel hybrid micro-texture for improving the wear resistance of PCD tools / F. Wu, N. Zhang, Z. Guo // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49. – P. 28076–28088. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.04.023.
79. Durrand, C. Super Hard, Super Thick Diamond Cutters for Hard Rock Drilling / C. Durrand // Stanford Research Paper. – 2010.
80. Zhang, W. The Initial Single Cutter Test of the NETL Ultra Deep Drilling Simulator / W. Zhang [et al.] // Proceedings of the 45th US Rock Mechanics Symposium (ARMA). – 2011.
81. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – Москва : Госстандарт СССР, 1988.
82. Zhang, W. The Initial Single Cutter Test of the NETL Ultra Deep Drilling Simulator / W. Zhang [et al.] // Proceedings of the 45th US Rock Mechanics Symposium (ARMA). – 2011.
83. Полушин, Н. И. Влияние состава, структуры и свойств матриц на стойкость алмазного бурового инструмента / Н. И. Полушин, А. В. Богатырев, А. И. Лаптев, М. Н. Сорокин // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2016. – № 1. – С. 60-66. – DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-60-66>.
84. Regulating the binder phase of polycrystalline diamond compact by formation of interpenetrating network to improve comprehensive properties // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2023. – Vol. 113. – Article 106075. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106075.
85. Telcon Diamond Cutting Tools. What is Polycrystalline Diamond (PCD)? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://telconpcd.com/what-is-polycrystalline-diamond-pcd/> (дата обращения: 02.07.2025).
86. Сергейчев, К. Ф. Алмазные CVD-покрытия режущих инструментов (обзор) / К. Ф. Сергейчев // Успехи прикладной физики. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 342–363.
87. Ramaseshan, S. The cleavage properties of diamond / S. Ramaseshan // Proc. Ind. Acad.

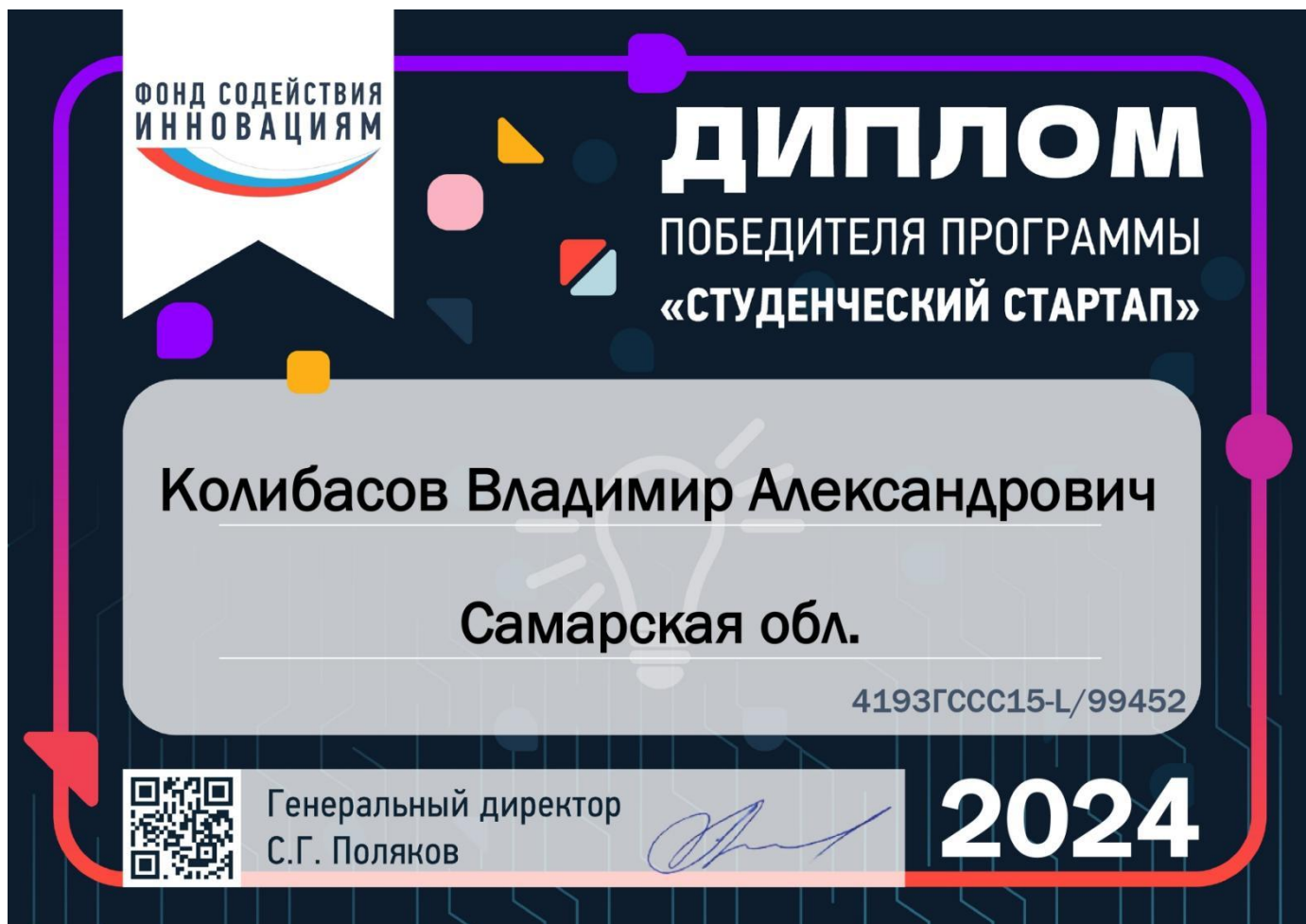
- Sci. – 1946. – A24. – P. 114-121.
88. Кухаренко, А. А. Алмазы Урала / А. А. Кухаренко. – Москва : Госгеолтехиздат, 1955. – 515 с.
89. Калинин, В. Д. Влияние скульптуры граней и дефектности низкосортных алмазов на их механические свойства / В. Д. Калинин // Алмазы. – 1972. – Вып. 1. – С. 1-3.
90. Калинин, В. Д. Зависимость прочностных свойств алмазов от их морфологической формы / В. Д. Калинин // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1975. – Вып. 3. – С. 4-6.
91. Karima Mohamed A. Ragab. Optical and electron optical studies on natural cubic diamonds [Электронный ресурс] / Karima Mohamed A. Ragab // University of London. – 1978. – Режим доступа: <https://repository.royalholloway.ac.uk/file/f5fb8314-f801-4e04-a41a-270f9fe133c6/1/10097455.pdf/> (дата обращения: 02.07.2025).
92. Демкин, Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – Москва : Наука, 1970. – 266 с.
93. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для технических вузов / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, И. А. Буше [и др.]. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2009. – 664 с.
94. Chen, F. Thermal residual stress of polycrystalline diamond compacts / F. Chen, G. Xu, C. Ma, G. Xu // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2010. – С. 227–232.
95. Халбашкеев, А. На острие бурового долота / А. Халбашкеев // Нефтегазовая промышленность. – 2022. – № 2. – С. 38-41.
96. Зайцев, В. И. Эффективность использования долот PDC / В. И. Зайцев, А. В. Карпиков, В. В. Че // Известия Сибирского отделения Секции наук о земле РАЕН. – 2014. – № 5 (48). – С. 58-66.
97. Bellin, F. The current state of PDC bit technology. Part 1 of 3: Development and application of polycrystalline diamond compact bits have overcome complex challenges from the difficulty of reliably mounting PDC cutters in bit bodies to

- accelerated thermal wear / F. Bellin, A. Dourfaye, W. King, M. Thigpen // World Oil. – 2010. – P. 41–46.
98. Xu, J. Advanced Coating to Mitigate PDC Cutter Thermal Degradation / J. Xu, G. D. Zhan, T. E. Moellendick, W. Jiang // International Petroleum Technology Conference. – 2022. – Paper IPTC-21954-MS. – DOI: 10.2523/IPTC-21954-MS.
99. ГОСТ 21318-75. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. – Москва : Изд-во стандартов, 1975. – 23 с.
100. ГОСТ 2999–75. Метод измерения твердости по Виккерсу. – Москва : Изд-во стандартов, 1987. – 31 с.
101. Ибатуллин, И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев : монография / И. Д. Ибатуллин. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
102. Можин, Н. А. Основы теории резания материалов : учебное пособие / Н. А. Можин, В. А. Аврелькин, Е. А. Федулов. – Иваново : ИВГПУ, 2018. – 84 с.
103. Ибатуллин, И. Д. Методика и устройство для испытания PDC резцов на абразивное изнашивание / И. Д. Ибатуллин, В. А. Колибасов // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России : сб. тр. XVII Всерос. науч.-техн. конф. – Москва, 2024. – С. 207–216.
104. Колибасов, В. А. Поиск оптимального метода контроля PDC резцов при абразивном изнашивании / В. А. Колибасов // Актуальные проблемы надежности машин и оборудования : сб. тез. докл. регион. науч.-техн. семинара, 16–17 мая 2024 г. / Самар. гос. техн. ун-т ; ред. И. Д. Ибатуллин. – Самара, 2024. – С. 10–11.
105. Ибатуллин, И. Д. Устройство для испытания PDC резцов на абразивное изнашивание с измерительным блоком для сбора данных / И. Д. Ибатуллин, А. С. Нечаев, В. А. Колибасов // INTERDISCIPLINARY RESEARCH: PAST EXPERIENCE, PRESENT OPPORTUNITIES, STRATEGIES THE FUTURE : Collection of articles XXXV International Scientific and Practical Conference. – Melbourne : ICSRD «Scientific View», 2023. – P. 80-88.
106. Колибасов, В. А. Разработка методики и устройства для испытания PDC резцов на абразивное изнашивание / В. А. Колибасов, И. Д. Ибатуллин, К. В.

- Парфенов, Е. С. Гордеева // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, № 6. – С. 53-62. – DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-6-53-62>.
107. Колибасов, В. А. Разработка лабораторного триботехнического комплекса для испытаний PDC-резцов на изнашивание / В. А. Колибасов, И. Д. Ибатуллин, В. А. Новиков // Frontier Materials & Technologies. – 2025. – № 1. – С. 9–19. – DOI: 10.18323/2782-4039-2025-1-71-1.
108. Ибатуллин, И. Д. Методы оценки износостойкости поликристаллических алмазных резцов / И. Д. Ибатуллин, В. А. Колибасов // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 9-11 апреля 2025 г. / Отв. ред. А. Р. Галлямов. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2025. – С. 201-204.
109. Ибатуллин, И. Д. Устройство для испытания резцов PDC на абразивное изнашивание / И. Д. Ибатуллин, В. А. Колибасов // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 10-12 апреля 2024 г. / Отв. ред. А. Р. Галлямов. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2024. – С. 163-166.
110. Пат. 2821174 С1 Российская Федерация, МПК G01N3/56. Устройство для испытания резцов PDC на абразивное изнашивание : № 2024107867 : заявл. 26.03.2024 : опубл. 17.06.2024 / И. Д. Ибатуллин, К. В. Парфенов, С. В. Иваняков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет".
111. ГОСТ 23.207–73. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание. — Переизд. сент. 1980. — Москва : Издательство стандартов, 1980. — 11 с.
112. Галлямов, А. Р. Фрикционная совместимость материалов : учебное пособие / А. Р. Галлямов, Р. Г. Гришин, И. Д. Ибатуллин. — Самара : Самарский государственный технический университет, 2014. — 146 с.

113. Патент 2482464 Рос. Федерация. Устройство для триботехнических испытаний материалов / Ненашев М. В., Калашников В. В., Ибатуллин И. Д., Галлямов А. Р. [и др.] ; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 14.
114. Пат. 2821172 С1 Российская Федерация, МПК G01N3/56. Способ испытания PDC резцов на абразивное изнашивание : № 2024107890 : заявл. 26.03.2024: опубл. 17.06.2024 / И. Д. Ибатуллин, К. В. Парфенов, С. В. Иваняков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет".
115. Колибасов В.А. Фрактографический анализ механизмов разрушения PDC резцов / В.А. Колибасов, И.Д. Ибатуллин, Д.О. Копытин, В.А. Новиков, А.А. Акопян, А.С. Болдырева // Известия ВолгГТУ. Серия: Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении, 2025. - № 10 (305). - С. 40-45.
116. Glowka D.A. Effects of Thermal and Mechanical Loading on PDC Bit Life / D.A. Glowka, C.M. Stone // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1984. – SPE 13257. – P. 156. – DOI: 10.2118/13257-MS.
117. АЛ-КОМ. Лицензии и сертификаты [Электронный ресурс]: официальный сайт компании. – Режим доступа: <https://al-kom.com/company/licenses/> (дата обращения: 16.02.2026).
118. СТО ИНТИ 1.100.55-2024. Буровой породоразрушающий инструмент. PDC-резцы. Общие технические требования. – Введ. 04.10.2024. – Санкт-Петербург: АНО «Институт нефтегазовых технологических инициатив», 2024. – 19 с.
119. Чулкова В. В. Разработка методических и технологических решений по выбору долот PDC с усиленным антивибрационным вооружением: дис. ... канд. техн. наук / В. В. Чулкова. – Москва, 2017. – 142 с.
120. Колибасов, В. А. Оценка твердости материалов царапанием поликристаллической алмазной пластиной / В. А. Колибасов, В. А. Новиков, А. А. Акопян. // Современные материалы, техника и технологии. – 2026. – № 1 (63). – С. 4–12.

121. ГОСТ Р 51000.5–96. Государственная система стандартизации Российской Федерации. Общие требования к органам по сертификации продукции и услуг. – М.: Госстандарт России, 1996.
122. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Межгос. стандарт. – М.: Стандартиформ, 2019.
123. ГОСТ Р 58972–2020. Оценка соответствия. Общие правила отбора образцов для испытаний продукции при подтверждении соответствия. – М.: Стандартиформ, 2020.







ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «РН-СЕРВИС»
ФИЛИАЛ В Г. УФА
 (ООО «РН-Сервис» Филиал в г.Уфа)

Почтовый адрес: ул. Кировоградская, д.10, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450001
 Юридический адрес: ул. Кировоградская, д.10, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450001
 Телефон: +7 (347) 249-56-56 доб. 49000, канцелярия +7 (347) 249-56-56 доб.49073, e-mail: krs@rnservis.ru
 ОКПО 16302654, ОГРН 5077746876257, ИНН/КПП 7706660065/024543001

УТВЕРЖДАЮ
 Директор филиала ООО «РН-Сервис» в г.Уфа
 Мемедов А.В.

 15 сентября 2025 г.

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы
 Колибасова Владимира Александровича
 «Закономерности и критерии оценки поверхностного разрушения алмазных резов
 буровых долот и средства для их сертификационных испытаний»**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Колибасова Владимира Александровича на тему «Закономерности и критерии оценки поверхностного разрушения алмазных резов буровых долот и средства для их сертификационных испытаний», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 «Материаловедение», были использованы в 2025 г. для оценки стойкости PDC резов к поверхностному разрушению при трении

В ходе внедрения были использованы следующие результаты диссертационной работы:

- 1.Методика оценки стойкости PDC резов к поверхностному разрушению при трении о закрепленный абразив (металл-алмазный «забой»).
- 2.Классификация PDC-резов по стойкости к поверхностному разрушению.
- 3.специализированного оборудования для испытаний PDC-резов

Первый заместитель директора главный инженер
 Должность

Главный механик
 Должность



К.И. Фазлиахметов
 ФИО

П.С.Валсев
 ФИО

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



ООО «ХимБурСервис»
 Самара, ул. Ново-Садовая 21-15
 р./с.40702810829180002534 в Филиале «Нижегородский»
 ОАО «Альфа-Банк» г. Нижний Новгород
 к./сч. 30101810200000000824,
 ИНН 6316095560, БИК 042202824
 Тел. сот. (846) 990-57-14
Факс (846) 270-25-04
 e-mail:
himburs@list.ru

02 мая 2025 г.

Утверждаю

Директор ООО «Химбурсервис»



А.Н. Журавлев

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы
 Колибасова Владимира Александровича
 «Закономерности и критерии оценки поверхностного разрушения алмазных
 резцов буровых долот и средства для их сертификационных испытаний»**

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Колибасова Владимира Александровича на тему «Закономерности и критерии оценки поверхностного разрушения алмазных резцов буровых долот и средства для их сертификационных испытаний», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение, были использованы в 2025г. для оценки стойкости PDC резцов к поверхностному разрушению при трении.

В ходе внедрения были использованы следующие результаты диссертационной работы:

- методика оценки стойкости PDC резцов к поверхностному разрушению при трении о закрепленный абразив;
- классификация по группам стойкости PDC резцов к поверхностному разрушению;
- специализированное испытательное оборудование для испытаний PDC резцов.

Заместитель директора по инжинирингу
 и супервайзингу бурения

Е.Ю. Чумак