

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

Научный руководитель -

Новиков Владислав Александрович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты -

Шарин Петр Петрович
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
Института физико-технических наук
Севера СО РАН им. В.П. Ларионова –
обособленного подразделения ФГБУН
Федеральный исследовательский центр
«Якутский научный центр СО РАН»
г. Якутск

Попова Марина Сергеевна
кандидат технических наук, доцент
Высшей нефтяной школы
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Югорский государственный университет»
г. Ханты-Мансийск

Ведущая организация -

Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт», г. Москва

Защита диссертации состоится «02» октября 2026 г., в 11.00 ч, на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте <https://d99203902.samgtu.ru/spisok-dissertatsii>

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Луц Альфия Расимовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время около 70% мирового объема строительства скважин на нефть и газ приходится на буровые долота, вооруженные алмазными резцами. 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.

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.

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.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют пунктам 1, 5, 6 и 7 паспорта специальности 2.6.17. – «Материаловедение».

Научная новизна

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 резах 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 работы

1. 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».

Достоверность полученных результатов

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 рассчитывалась по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95.

Основные 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.

Апробация результатов. 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.).

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

Личный вклад автора.

Личный вклад 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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 123 наименований. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста и содержит 61 рисунок, 14 таблиц и 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость проведенных исследований. Приведены сведения об апробации и достоверности полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также дана краткая характеристика диссертационной работы.

В первой главе представлен литературный обзор по теме диссертационного исследования. Показан вклад ведущих ученых в проблему оценки качества PDC-резцов, таких как: П.П. Шарин, М.С. Попова, С.А. Перфилов, В.М. Прохоров, Д.Ю. Сериков, К.В. Борисов, А.А. Третьяк, О.Б. Трушкин, Н.И. Полушин, О.С. Котельникова, А.И. Лаптев, М.Н. Сорокин и др. Проанализированы преимущества и недостатки существующих методов и технических средств для оценки стойкости PDC-резцов к поверхностному разрушению.

Поскольку в России производитель данных изделий всего один и, как правило, в долотном производстве используются резцы зарубежного производства, то одним из средств повышения качества алмазных долот является входной контроль качества поступающих на сборку партий резцов зарубежного производства.

Вторая глава посвящена исследованию физических механизмов повреждаемости и разрушения поликристаллической алмазной пластины при трении о забой. С помощью микроскопа JEOL JSM-6390A с приставкой JED для проведения рентгеноспектрального микроанализа проведены фрактографические исследования изношенных поверхностей, сформированных при трении PDC-резцов в процессе бурения скважин. Во время исследований проверялась исходная гипотеза о том, что причиной постепенного разрушения режущей кромки алмазной пластины является абразивное изнашивание, наиболее часто упоминаемое в научных трудах. Фрактограммы поверхностей рабочих кромок резцов приведены на рисунках 1-4. По границам изображения микроструктуры зоны поверхностного разрушения расположены характерные субзеренные и межзеренные структуры, указывающие на характер накопления повреждений внутри и на границах алмазных зерен. Исследования позволили выявить шесть характерных субструктур поверхностного разрушения: полосчатая

(рисунок 1), каменистая (рисунок 2), ступенчатая (рисунок 3а), серповидная (рисунок 3б), ямочная (рисунок 3в) и канавочная.

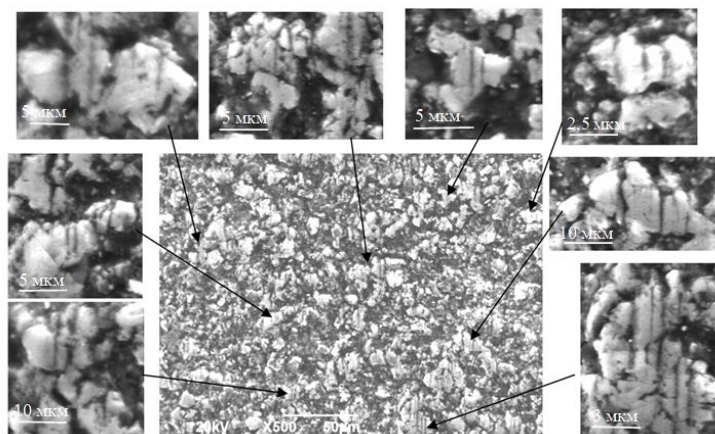


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности зоны трения PDC-резца с полосчатой субструктурой

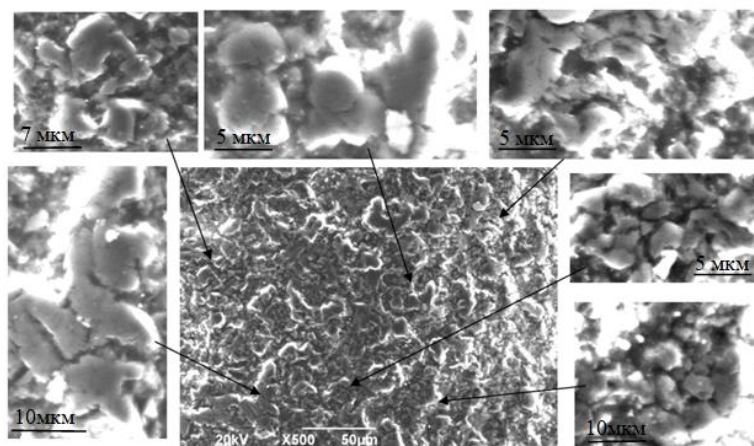


Рисунок 2 – Микроструктура поверхности зоны трения PDC-резца с каменистой субструктурой

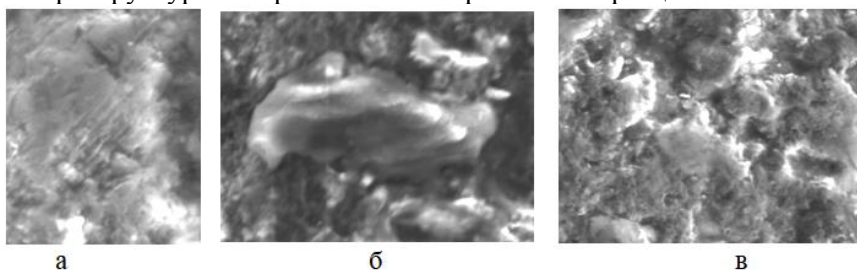


Рисунок 3 – Изображение других субструктур поверхности зоны трения PDC-резцов:
а) ступенчатая б) серповидная в) ямочная

Полосчатая субструктура возникает в случае, когда вектор внешних сил лежит вдоль кристаллографических плоскостей $\{111\}$ алмазных зерен с наименьшей энергией разрушения. В зависимости от пространственного расположения данных плоскостей полосчатая субструктура может преобразоваться в ступенчатую и серповидную, когда плоскость скольжения направлена вдоль плоскостей $\{111\}$.

Ямочная субструктура возникает в результате скалывания фрагментов алмазных зерен по краям трещин. Более глубокие ямки возникают на участках слияния трещин. Слияние ямок образует канавочную субструктуру (по границам зерен).

Наиболее частой субструктурой является каменистое разрушение зерен, когда трещины, сливаясь, разрушают алмазные зерна на фрагменты величиной менее 5 мкм.

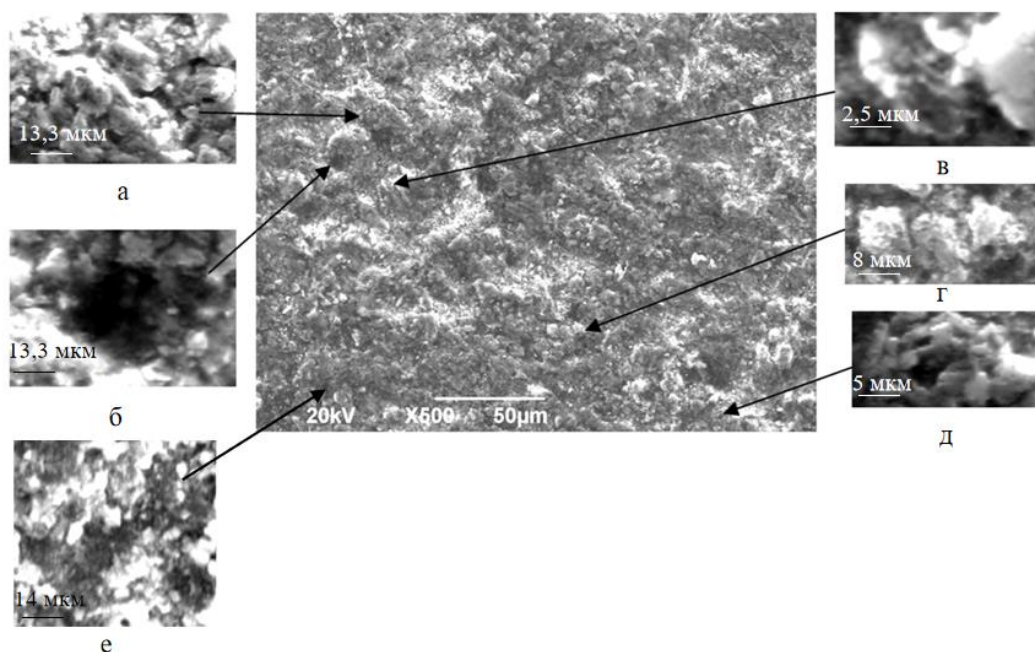


Рисунок 4 – Микроструктура поверхности зоны трения PDC-резцов с различными субструктурами: а) каменная б) ямочная в) серповидная г) полосчатая д) ступенчатая е) канавочная

Установлено, что ведущим механизмом поверхностного разрушения поликристаллической алмазной пластины при трении является контактная усталость, обусловленная постепенным накоплением дефектов (микротрещин) в алмазных зернах с последующим их разрушением под действием циклических нагрузок от взаимодействия с неоднородной разбуриваемой породой.

В третьей главе представлены результаты разработки критерия предельного состояния PDC-резцов при поверхностном разрушении в условиях эксплуатации. Показаны результаты разработки нового метода оценки твердости горных пород, позволяющего оценивать буримость пород с учетом степени поверхностного разрушения 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. Кроме того, трение 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 является критерием работоспособности бурового долота.

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

где F_n – нормальная нагрузка, $HV_{пор.}$ величина твердости разбуриваемой породы, n – количество резцов долота, вдавливаемых в забой под действием осевой нагрузки, A_{pi} – часть площади контакта резца, сформированная соприкосновением режущей кромки с породой, A_{ii} – часть площади контакта резца, сформированная изношенной поверхностью режущей кромки.

Величина твердости материала зависит от условий проведения оценки и формы внедряемого в материал индентора.

Для уточненной оценки твердости горных пород разработана методика, основанная на царапании горных пород кромкой PDC-резцов. Данным методом оценки твердости царапанием провели оценку твердости образцов, относящихся к категории крепких пород –

гранита и кварцитов (6-7 единиц по Моосу), бурение которых вызывает быстрое поверхностное разрушение резцов (таблица 1). Цель данных исследований – подобрать модельный материал, позволяющий при испытаниях на трение создать имитацию бурения крепких пород для возможности ускоренного получения результатов лабораторных испытаний резцов.

Таблица 1

Оценка твердости крепких пород методом царапания PDC-пластиной

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

В качестве модельных материалов были рассмотрены: 1) шлифовальный круг с зернами карбида кремния зеленого. Второй материал рассматривался в качестве возможной альтернативы по сравнению со шлифовальными кругами (в том числе алмазными и эльборовыми), а также высоких абразивных свойств при работе по камню. Результаты испытаний показаны в таблице 2.

Таблица 2

Оценка твердости модельных материалов методом царапания PDC-пластиной

Образец	Характеристики	Ширина царапины, мкм	Глубина врезания, мкм	Твердость, МПа
Шлифовальный круг (64С)	Размер зерна: 355-425 мкм; материал связка: керамическая; материал зерна: зеленый карбид кремния.	1885	60	340
Алмазный отрезной диск (НС 302)	Размер зерна: 90-100 мкм; материал связка: стальная, твердая; материал зерна: поликристаллический алмаз.	387	2,67	15852

С учетом твердости крепких пород для их моделирования при испытаниях выбран алмазный отрезной диск с твердой связкой (6600 МПа по Виккерсу). Шлифовальный круг непригоден из-за недостаточной прочности связки, высокой пористости и быстрого разрушения при большой глубине внедрения резца. Для сертификационных испытаний PDC-резцов принят металл-алмазный инструмент.

Четвертая глава посвящена разработке нового метода и устройства для входного контроля стойкости PDC-резцов при трении о металл-алмазный «забой».

Разработано специализированное оборудование для оценки стойкости PDC-резцов к поверхностному разрушению (рисунок 5). При испытаниях верхняя кромка резца прижимается к алмазному отрезному диску под углом 15° (рисунок 6) и трется о боковую поверхность алмазосодержащего обода, имитирующего забой.

То, что «забой» перевернут по отношению к резцу создает условия для самопроизвольного удаления (осыпания) частиц износа из зоны трения и позволяет свободно нагружать резец сверху фиксированной нагрузкой через вращающийся «забой», используя в качестве привода стандартное оборудование – станки сверлильно-фрезерной группы. Система мониторинга экспериментальных данных построена на базе системы сбора данных E14-140 и программного обеспечения PowerGraph.

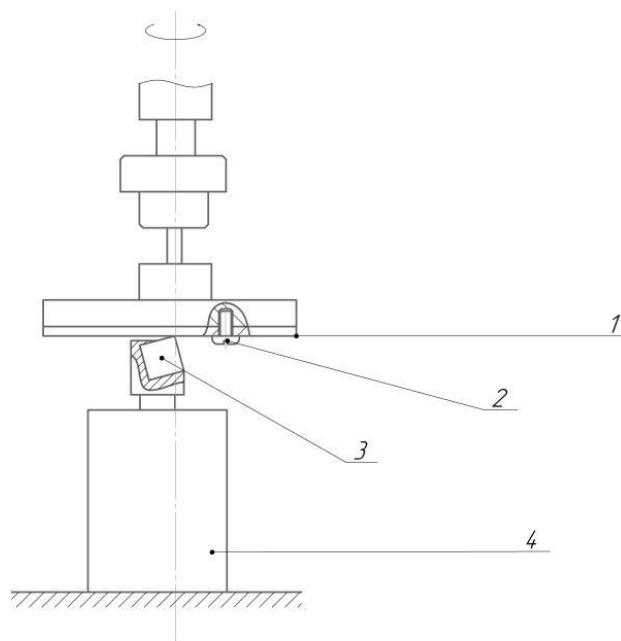


Рисунок 5 – Специализированное оборудование для испытания PDC-резцов на стойкость к поверхностному разрушению: 1 – алмазный отрезной диск, 2 – фиксатор, 3 – PDC-резец, 4 – система сбора данных

Измерительный блок оснащен датчиками температуры, нормальной нагрузки и силы трения. Диапазон измеряемых значений датчиков: температура – до 600°C, 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.

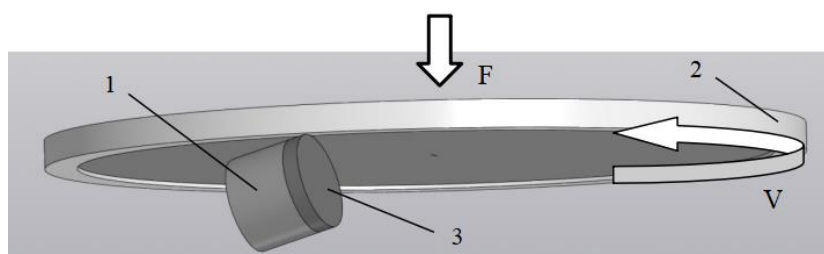


Рисунок 6 – Схема испытаний резцов на стойкость к поверхностному разрушению: 1 – испытуемый резец, 2 – контртело (алмазный отрезной диск), 3 – поликристаллическая алмазная пластина, F – фиксированная нормальная нагрузка, V – линейная скорость вращения алмазного отрезного диска

Испытания PDC-резцов на поверхностное разрушение проводятся при следующих режимах: схема трения: «кромка резца – алмазный диск»; контактная нагрузка - 200 Н; частота вращения металлического «забоя» – 200 об/мин; контрообразец («забой») – алмазный отрезной диск (Ø125 мм); образец– испытуемый PDC-резец; угол крепления образца относительно «забоя» - 15°; время испытаний - 30 мин; трение без смазки (сухое). Методика испытаний на поверхностное разрушение включает следующие этапы: из партии отбирают пять резцов и исследуют алмазную пластину на электронном микроскопе на дефекты. Проводят нагрев в муфельной печи до 750°C с повторным контролем структуры на термические повреждения. Испытание на стойкость: резец взвешивают; устанавливают в оправку; закрепляют с алмазным диском в станке; прикладывают осевую нагрузку 200 Н; включают стенд, опускают вращающийся диск на кромку резца; испытывают 30 минут; останавливают стенд; резец взвешивают и рассчитывают скорость весового изнашивания.

Апробация данного специализированного оборудования и методики в лабораторных условиях показала, что в сравнении с испытаниями на трение PDC-резца о природный камень металл-алмазный «забой» обеспечивает большую сходимость результатов, благодаря более высокой стабильности характеристик алмазных дисков, а также кратное сокращение длительности испытаний вследствие большей твердости контртела. Достоверность получаемых результатов обосновывается совпадением структуры разрушенной поверхности алмазного слоя после эксплуатации PDC-резцов на забое и после лабораторных испытаний. По сравнению с методиками использующими в качестве контртела шлифовальные круги предлагаемые алмазные отрезные диски с твердой связкой (6600 МПа по Виккерсу) дают низкий износ обода и позволяют использовать их с обеих сторон.

Пятая глава посвящена разработке критериев классификации партий резцов по показателю стойкости к поверхностному разрушению.

Приведены результаты ранжировочных испытаний PDC-резцов в состоянии поставки четырех различных классов, различных производителей с целью определения максимального диапазона изменения скорости поверхностного разрушения поликристаллических алмазных пластин, изготавливаемых на современном уровне производства, для разработки единых критериев оценки качества PDC-резцов на этапе входного контроля перед сборкой долот.

Для испытаний были отобраны по 5 резцов одного типоразмера ($\varnothing 13,5\text{мм}$) из 4-х партий различных классов. Каждая партия была условно промаркирована (в порядке снижения ценовой группы) как: «класс 1», «Royal-класс», «класс А», «класс В». При этом между ними были выявлены следующие сходства и отличия. Микроструктурный анализ (рисунок 7) показал, что PDC-резцы «класс 1» имеют четко различимые границы алмазных зерен и поры между ними, что характерно для вышечелоченных резцов. На остальных резцах алмазные зерна были покрыты металлом-связкой. Это подтверждается результатами химического анализа. Во всех резцах связка была представлена кобальтом и вольфрамом. Их распределение показано на рисунке 8. Меньше всего кобальта (менее процента) содержал резец «класс 1». На других резцах этот показатель был в 3-4 раза больше. Существенных структурных различий между резцами из остальных партий не выявлено. Все выступающие части (светлые участки фотографий) образованы алмазными частицами размером около 30 мкм. Поры между частицами заполнены кобальтом.

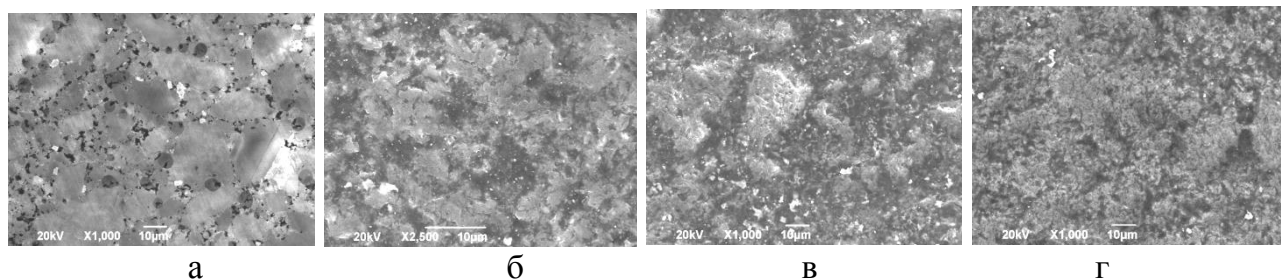


Рисунок 7 – Структура алмазной пластины резцов:
а) «класс 1» б) «Royal-класс» в) «класс А» г) «класс В»

Резцы №4 и №5 из каждой партии после электронной микроскопии подвергали нагреву до 750°C в муфельной печи с терморегулированием, имитируя термическое воздействие при лужении и пайке латунными и серебряными припоями. Повторная микроскопия показала отсутствие структурных повреждений и изменений механических свойств.

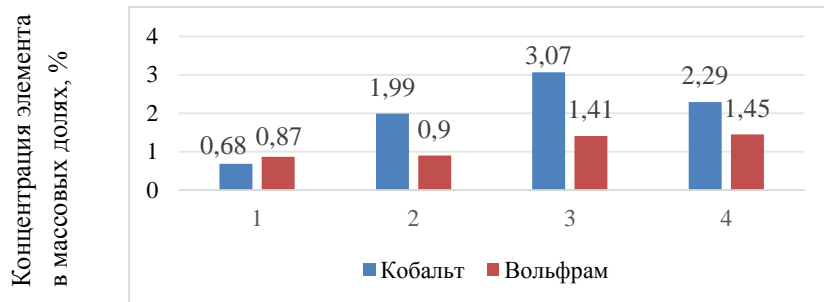


Рисунок 8 – Содержание вольфрама и кобальта в составе металлической связки на поверхности PDC-резцов 1 – «класс 1», 2 – «Royal-класс», 3 – «класс А», 4 – «класс В»

При испытаниях на трение температура саморазогрева PDC-резцов не превышала 180°C, максимальная сила трения составила 120-150Н. Эпюры (рисунок 9) подтверждают идентичность условий испытаний и показывают крутильные колебания амплитудой до 30% и осевые до 25%, что приближает условия к работе на забое. Рост силы трения в процессе испытаний обусловлен увеличением площади контакта и вскрытием алмазов в ободке, что является признаком корректного эксперимента.

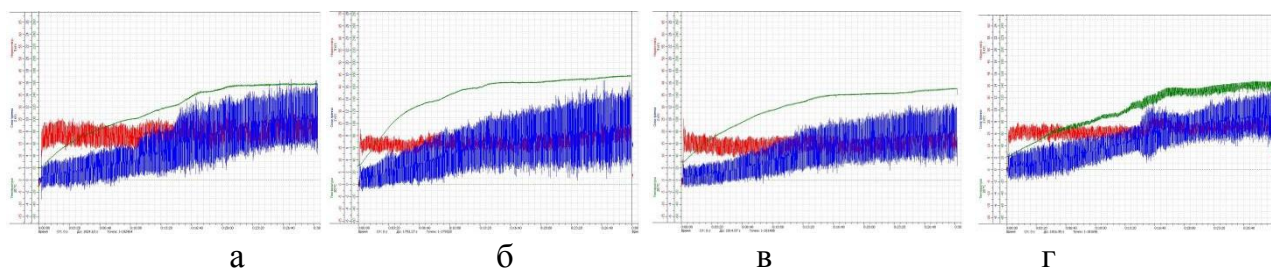


Рисунок 9 – Эпюры испытаний алмазной пластины PDC-резцов (синий график- сила трения, красный график- нормальная нагрузка, зеленый график- температура): а – «класс 1», б – «Royal-класс», в – «класс А», г – «класс В»

Наибольшая потеря массы соответствовала партии «класс 1» (средняя скорость изнашивания резцов 9,35 мг/час). Меньшую скорость разрушения показали резцы из других партий: в партии «Royal-класс» средняя скорость весового разрушения резцов составила 4,18 мг/час, в партии «класс В» - 4 мг/час, а в партии «класс А» - 3,22 мг/час.

Более агрессивными к металл-алмазному «забою» оказались PDC-резцов из партии «класс 1» (средняя скорость разрушения забоя 5,82 г/час), что связано с наличием на поверхности алмазных частиц с острыми кромками, не «притупленными» пластичным кобальтом. Существенно меньше разрушают «забой» резцы с повышенным содержанием связки, так резцы из партии и «Royal-класс» в среднем разрушают диск со скоростью 3,55 г/час, соответственно, из партии «класс В» - 1,99 г/час, а из партии «класс А» - 2,07 г/час.

Полученные данные, сведенные в таблицу 3, позволяют разработать критерии для классификации партий резцов по показателю стойкости к поверхностному разрушению. Данная классификация основана на результатах испытаний по схеме рисунка 6. Данное деление на группы может использоваться в качестве критерия для оценки стойкости резцов к поверхностному разрушению на этапе входного контроля качества, в т.ч. в целях сертификации контролируемых партий.

Ранжирование PDC-резцов по стойкости к поверхностному разрушению*

Группа стойкости к поверхностному разрушению	Скорость изнашивания, мг/час
1 (стойкие)	< 2
2 (средней стойкости)	$\geq 2 \dots < 4$
3 (пониженной стойкости)	$\geq 4 \dots < 6$
4 (низкостойкие)	$\geq 6 \dots < 8$

*PDC-резцы, не отвечающие требованиям вышеуказанных классов также могут использоваться в нефтегазовой отрасли для бурения материалов, не вошедших в перечень пород по классификации СТО ИНТИ 1.100.55-2024).

Рассмотрено влияние микроструктуры поликристаллических алмазов на стойкость к поверхностному разрушению. В PDC-резцах используются алмазные зерна фракций 20-40 мкм и высокодисперсные (1-5 мкм) для заполнения межзеренного пространства с целью снижения доли кобальта и увеличения углеродных связей. Размеры зерен определяли по ГОСТ 5639-82 методом измерения хорд на микрофотографиях (увеличение 500×) в 5 полях зрения с усреднением по критерию Стьюдента ($P=0,95$).

Установлена монотонная зависимость между размером зерен и стойкостью к поверхностному разрушению (рисунок 10). Механизм разрушения включает фрагментацию зерен трещинами, скалывание кромок и границ с последующим ямочным и канавочным разрушением. Потеря массы пропорциональна общей длине границ зерен и трещин, поэтому мелкозернистые PDC-пластины разрушаются интенсивнее.

Проведен анализ влияния химического состава PDC-пластин на стойкость к поверхностному разрушению для резцов из 40 партий различных поставщиков.

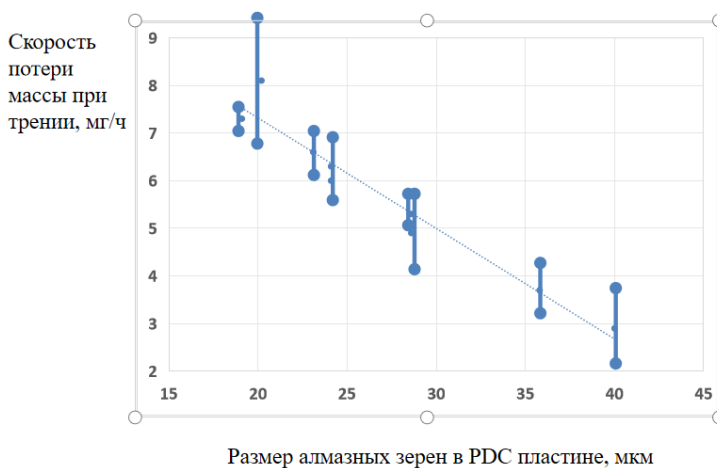


Рисунок 10 – Зависимость весового износа PDC-резцов от размеров алмазных зерен

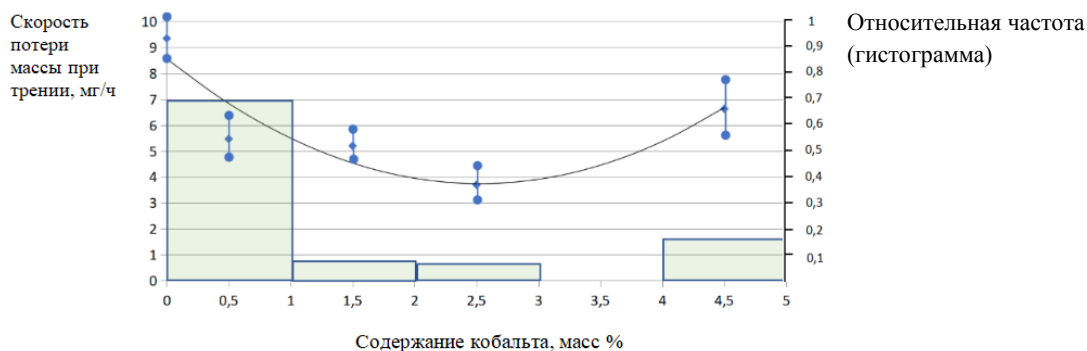


Рисунок 11 – Зависимость весового износа PDC-резцов от содержания кобальта в составе PDC-пластин

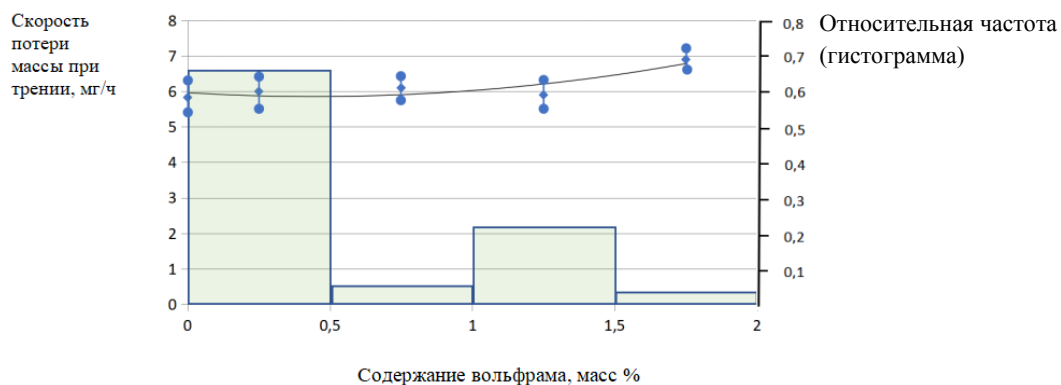


Рисунок 12 – Зависимость весового износа PDC-резцов от содержания вольфрама в составе PDC-пластин

В большинстве испытанных партий резцов содержание кобальта в поликристаллических пластинах составляет до 1% масс. Минимальное поверхностное разрушение наблюдается при 2-3% масс. кобальта, максимальное - при его минимальном содержании, что объясняется недостаточным связыванием алмазных зерен. Рост скорости разрушения при содержании кобальта свыше 4% масс. обусловлен его расклинивающим действием при нагреве и снижением прочности из-за замены прочных карбидных связей менее прочными через кобальтовую связку (рисунок 11).

Типичное содержание вольфрама - до 0,5% масс. Вольфрам практически не влияет на скорость разрушения, поскольку присутствует в виде карбидов с хорошим сцеплением с кобальтом (рисунок 12). Избыточное содержание вольфрама (свыше 1,5% масс.) действует аналогично избытку кобальта.

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях

1. Колибасов В.А., Ибатуллин И.Д., Парфенов К.В., Гордеева Е.С. Разработка методики и устройства для испытания PDC-резцов на абразивное изнашивание // Нефтегазовое дело. - 2024. - Т. 22. - № 6. - С. 53-62.

2. Колибасов В.А., Ибатуллин И.Д., Новиков В.А. Разработка лабораторного триботехнического комплекса для испытаний PDC-резцов на изнашивание // Frontier Materials & Technologies. - 2025. – No.1. - С.9–19. (Переводная версия: Kolibasov V.A., Ibatullin I.D., Novikov V.A. Development of a laboratory tribotechnical facility for testing PDC cutters for wear. Frontier Materials & Technologies. – 2025. - No.1. – P.9–19.

3. Колибасов В.А., Ибатуллин И.Д., Копытин Д.О., Новиков В.А., Акопян А.А., Болдырева А.С. Фрактографический анализ механизмов разрушения PDC-резцов // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. - 2025. - № 10 (305). - С. 40-45.

Патенты

4. Патент № 2821174 С1 Российская Федерация, МПК8 G01N3/56. Устройство для испытания PDC-резцов на абразивное изнашивание: № 2024107867: заявл. 26.03.2024: опубл. 17.06.2024 / Ибатуллин И.Д., Парфенов К.В., Иваняков С.В., Кац Н.Г., Новиков В.А., Колибасов В.А., Копытин Д.О., Голицяев Н.С.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет".

5. Патент № 2821172 С1 Российская Федерация, МПК8 G01N3/56. Способ испытания PDC-резцов на абразивное изнашивание: № 2024107890: заявл. 26.03.2024: опубл. 17.06.2024 / Ибатуллин И.Д., Парфенов К.В., Иваняков С.В., Кац Н.Г., Колибасов В.А., Копытин Д.О.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет".

Публикации в других изданиях

6. Ибатуллин И.Д., Колибасов В.А. Устройство для испытания PDC резцов на абразивное изнашивание //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.

7. Ибатуллин И.Д., Нечаев А.С., Колибасов В.А. Устройство для испытания PDC резцов на абразивное изнашивание с измерительным блоком для сбора данных // 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.

8. Ибатуллин И.Д., Колибасов В.А. Методика и устройство для испытания PDC резцов на абразивное изнашивание //Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: сб. тр. XVII Всерос. науч.-техн. конф. – Москва. - 2024. – С. 207–216.

9. Ибатуллин И.Д., Колибасов В.А. Методы оценки износостойкости поликристаллических алмазных резцов //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.

10. Колибасов В.А. Поиск оптимального метода контроля PDC резцов при абразивном изнашивании //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.

11. Шальнова Д.Э., Колибасов В.А., Новиков В.А. Разработка аппаратного комплекса и методики испытаний PDC – резцов на изнашивание //Ашировские чтения: сб. тр. всероссийск. науч.-техн. конф., 16–17 мая 2024 г. / Самар. гос. техн. ун-т, – Самара. - 2025. – С. 671–673.

12. 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.

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета
99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королёва» (протокол № 7 от 29.06.2026 г.)

Заказ № _____ Формат 60x841 /16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе. ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет». Отдел типографии
и оперативной полиграфии. 443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус