

Разработка лабораторного триботехнического комплекса для испытаний PDC-резцов на изнашивание

Колибасов Владимир Александрович^{*1}, аспирант,
ассистент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств»
Ибатуллин Ильдар Дугласович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств»
Новиков Владислав Александрович², кандидат технических наук,
доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»,
старший научный сотрудник лаборатории рентгеновской дифрактометрии, электронной и зондовой микроскопии
Самарский государственный технический университет, Самара (Россия)

*E-mail: mahp@samgtu.ru,
csstea@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0503-2533>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8052-305X>

Поступила в редакцию 10.02.2025

Пересмотрена 25.02.2025

Принята к публикации 11.03.2025

Аннотация: В практике бурения нефтегазовых скважин алмазными долотами, вооруженными PDC-резцами, имеют место случаи несоответствия качества резцов заявленному классу. При этом применяемые в настоящее время методы натурных испытаний, когда в качестве контртела используют гранитный камень, являются длительными и дорогостоящими, что затрудняет их применение для оперативного входного контроля новых партий PDC-резцов, поступающих на сборку алмазных долот. Это обусловило необходимость разработки лабораторного триботехнического комплекса для количественной оценки способности PDC-резцов противостоять истиранию об абразивные материалы. Исследование посвящено разработке специализированного триботехнического комплекса, позволяющего проводить испытания на изнашивание PDC-резцов различных типоразмеров при трении об алмазосодержащий металлический забой, в качестве которого предложено использовать алмазные отрезные диски. В состав разработанного лабораторного триботехнического комплекса входят: электромеханический привод вращения (станок сверлильно-фрезерной группы); измерительный блок с датчиками нормальных нагрузок, силы трения и температуры саморазогрева резца при испытаниях; рычажный механизм нагружения; набор оправок для возможности установки PDC-резцов различных типоразмеров; система сбора данных и лицензионное программное обеспечение. Результаты апробации разработанного лабораторного триботехнического комплекса на PDC-резцах различных партий показали, что испытания на новом оборудовании позволяют достаточно быстро получать данные о скорости изнашивания рабочих кромок PDC-резцов. Разработанные методики, оборудование и критерии можно использовать для возможности сертификации износостойкости PDC-резцов.

Ключевые слова: алмазное долото; PDC-резец; триботехнический комплекс; алмазосодержащий металлический забой.

Для цитирования: Колибасов В.А., Ибатуллин И.Д., Новиков В.А. Разработка лабораторного триботехнического комплекса для испытаний PDC-резцов на изнашивание // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 1. С. 9–19. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-1-71-1.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее востребованными буровыми инструментами при бурении нефтяных и газовых скважин в мягких породах, при наличии в них прослоев твердых горных пород, и породах средней твердости являются долота с резцами PDC (Polycrystalline Diamond Compact) [1]. Известно, что породоразрушающие PDC-резцы являются наиболее нагруженными и наименее надежными элементами конструкции алмазных буровых долот [2; 3]. При эксплуатации на забое они оказывают скалывающее, дробящее и абразивное действие на разбуриваемую породу. В свою очередь, и порода оказывает разрушающее воздействие на резцы: происходит изнашивание их рабочей кромки при трении о породу, что приводит к постепенному снижению агрессивности резцов и, соответственно, уменьшению скорости бурения. В большинстве случаев именно долговечность PDC-резцов лимитирует межре-

монтный срок службы алмазного долота, а значит, и эффективность бурения скважин [4; 5].

При бурении поисковых, разведочных и эксплуатационных скважин буровой инструмент проходит через сланцы, известняки, песчаники, кварциты и другие породы различной крепости и абразивности. Для определения степени износа долот (коронок) приходится поднимать инструмент на поверхность. Длительность процесса спускоподъемных операций значительно удорожает строительство скважин [6].

PDC-резцы представляют собой сверхтвердый монолитный композитный материал, полученный спеканием твердосплавной карбид-вольфрамовой основы на кобальтовой связке и поликристаллической алмазной пластины [7]. Процесс спекания проводится в кубических прессах при сверхвысоких давлениях (6...8 ГПа) и температурах (1400...1500 °С) в жидкой среде металлического катализатора (кобальта) [8]. Несмотря на существующую систему

многоэтапного контроля при производстве PDC-резцов, включающую контроль сырья, давления при спекании, визуальный осмотр, анализ дефектов и лабораторные испытания на удар и изнашивание, исследования показали, что имеют место изменения износостойкости PDC-резцов от партии к партии [9]. Поэтому внедрение входного контроля качества резцов поступающих на сборку алмазных долот должно быть неотъемлемой частью реализации системы качества на долотном производстве. Проблема осложняется тем, что в настоящее время отсутствуют международные нормы и стандарты оценки качества PDC-резцов. Еще недавно каждая компания, имеющая алмазное производство, разрабатывала свои методы испытаний и критерии для анализа их надежности. Теперь можно видеть тенденцию к проведению полунатурных испытаний, при которых испытуемые PDC-резцы (в реальном исполнении) изнашивают о вращающийся природный камень (рис. 1), моделирующий забой [10].

Например, в общих технических требованиях Института нефтегазовых технологических инициатив к лопастным долотам режущего действия, оснащенным резцами с алмазной твердосплавной пластиной¹, предлагается проводить испытания PDC-резцов на абразивную стойкость на базе токарно-карусельного станка, включающего оправку для установки в резцедержателе испытуемого резца, установленного под заданным углом к поверхности цилиндрического гранитного камня. Станок обеспечивает резание породы с постоянной угловой скоростью (40...80 об/мин) и осевой нагрузкой. Предел прочности гранита задается в диапазоне 150...250 МПа. Для охлаждения резца используется штатная система подачи смазывающе-охлаждающей жидкости. Глубина резания при испытаниях составляет 0,25...1,0 мм. Рабочий ход резца – от центра к периферии. Обратный ход проводится без контакта с поверхностью камня. После каждого цикла поверхность трения резца фотографируется для оценки объемного износа, далее циклы повторяются.

В лаборатории сверхтвердых материалов МИСиС описан схожий метод оценки износостойкости PDC-резцов, который включает сверление гранита на вертикальном токарном станке с револьверной головкой под высокой нагрузкой. Скорость изнашивания определяется как изменение веса резца до начала эксперимента и после выполнения определенного числа проходок в граните [10]. Подобное оборудование для испытаний PDC-резцов использовали фирмы LANDS Superabrasives, Element Six (Е6), ООО «Дриллинг Индастриал Системс», ОАО «Волгабурмаш» и др. Например, фирма Element Six (Е6) испытывает резцы на износостойкость путем точения гранитного образца прочностью 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 [4]. В Уфимском государственном нефтяном техническом университете предложена методика испытаний резцов на изнашивание при трении о гранит с учетом профиля забоя [11]. 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.

¹ Долота лопастные режущего действия, оснащенные резцами с алмазной твердосплавной пластиной. Общие технические требования. СПб.: Институт нефтегазовых технологических инициатив, 2022. 81 с.

Рассмотренные испытания привлекательны созданием условий, максимально схожих с эксплуатационными. Однако некоторые неучтенные факторы, например действующий на резец поток абразивосодержащего бурового раствора, могут привести к гидроэрозионному изнашиванию твердосплавной основы под поликристаллической алмазной пластиной, лишая ее опоры (рис. 2). Кроме этого, в процессе бурения поддерживается заданная осевая нагрузка на долото и на резцы в частности [12; 13]. 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 проводимых испытаний может привести к появлению погрешности в измерениях в зависимости от местоположения истираемого слоя забоя [14; 15]. Для решения данной проблемы в качестве контртела при испытаниях предложено использовать искусственные абразивные материалы – шлифовальные круги марки 64С (карбид кремния), которые за счет повышенной твердости ускоряют процесс изнашивания [10].

Несмотря на общую схему испытаний, можно констатировать, что в настоящее время отсутствует общепринятая методика испытаний резцов на изнашивание, что 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 натурных 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.

Цель исследования – разработка лабораторного триботехнического комплекса и методики испытаний PDC-резцов на изнашивание.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка методики для испытаний PDC-резцов на изнашивание

При разработке оборудования для лабораторных испытаний резцов на изнашивание были приняты следующие предпосылки. Поскольку конструкция долота предусматривает наклонное (как правило, под углами от 5 до 30°) по отношению к забою расположение резцов,

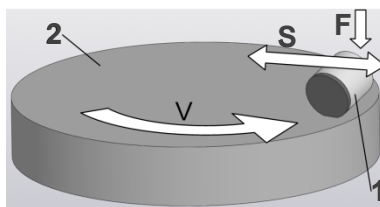


Рис. 1. Схема испытаний PDC-резцов на изнашивание:

1 – испытуемый резец; 2 – контртело (гранитный камень);

F – нормальная нагрузка; S – поперечная подача; V – скорость вращения подвижного контртела

Fig. 1. Scheme of PDC cutter wear tests:

1 – tested cutter; 2 – counterbody (granite stone); F – normal load; S – transverse feed; V – rotation speed of the movable counterbody

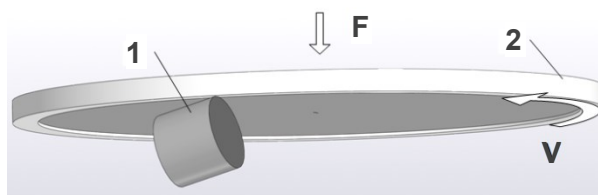


Рис. 2. Предлагаемая схема испытаний PDC-резцов на изнашивание:

1 – испытуемый резец; 2 – контртело (алмазный отрезной диск);

F – фиксированная нормальная нагрузка; V – скорость вращения диска

Fig. 2. The proposed scheme for wear tests of the PDC cutters:

1 – tested cutter; 2 – counterbody (diamond cutting wheel); F – fixed normal load; V – wheel rotation speed

при котором с породой контактирует не вся поверхность резца, а только выступающий край алмазной поликристаллической пластины (рабочая кромка), было принято решение задавать за счет геометрии оснастки угол, близкий к среднему в указанном диапазоне, – 15° .

Для ускорения испытаний на изнашивание предложено использовать в качестве контртела металло-алмазный «забой» в виде алмазосодержащего обода алмазного отрезного диска. 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. Для испытаний PDC-резцов рекомендуется брать круги с твердой связкой (6600 МПа по Виккерсу). Это снизит скорость изнашивания алмазного обода и позволит использовать один диск дважды: сначала с одного торца, затем с другого. При этом не происходит засаливания диска. Испытываемая кромка PDC-резца эффективно удаляет слой металла и вскрывает новые алмазные зерна. Кроме того, с повышением твердости контртела увеличивается давление в месте контакта резца с металло-алмазным забоем при трении. Это создает условия для существенного форсирования испытаний на изнашивание.

Рекомендуемая нагрузка на фрикционный контакт составляет 20 кгс (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 ал-

мазного 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 соответствует 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.

Испытания PDC-резцов на стойкость к абразивному изнашиванию проводились при следующих режимах испытаний:

- схема трения: «кромка зубка – алмазный диск»;
- частота вращения металлического «забоя» – 200 об/мин;
- контрообразец («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.

Разработка оборудования для лабораторных испытаний PDC-резцов на изнашивание

С учетом вышесказанного на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств» Самарского государственного технического университета был разработан лабораторный программно-аппаратный комплекс (рис. 2, 3). Схема узла трения (рис. 2) данного комплекса в целом схожа со схемой натуральных испытаний, показанной на рис. 1. Вращающимся является и модельный забой относительно неподвижного резца, наклоненного по отношению к забою под эксплуатационным углом и врезающегося в него краем поликристаллической алмазной пластины. Отличие заключается в том, что забой перевернут по отношению к резцу, что создает условия для самопроизвольного удаления (осыпания) частиц износа из зоны трения. Кроме того, такое взаимное расположение позволяет свободно нагружать резец сверху фиксированной нагрузкой и вращать забой, используя в качестве привода стандартное и относительно недорогое оборудование – настольные станки сверлильной или сверлильно-фрезерной группы. Кромка резца вдавливается в алмазный обод на величину, определяемую фиксированной нормальной нагрузкой и относительно стабильными прочностными свойствами обода. Это создает идентичные условия трения при испытаниях различных резцов, а также более соответствует схеме нагружения резцов при бурении.

Конструкция устройства для проведения испытаний PDC-резцов на абразивное изнашивание представлена на рис. 3. Основными компонентами испытательного стенда являются:

1) привод, состоящий 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 (рис. 4), системы сбора данных E14-140 и программного обеспечения PowerGraph. Измерительный блок оснащен датчиками средней температуры саморазогрева PDC-резца, 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 T – до 600 °С, нормальная нагрузка F_n – до 1000 Н, сила трения $F_{тр}$ – 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. Поскольку материалы, из которых изготовлен PDC-резец (поликристаллическая алмазная пластина и твердый сплав), обладают хорошей теплопроводностью, то технологическое отверстие для измерения его средней температуры находится непосредственно под PDC-резцом;

3) оправка для PDC-резца. Обеспечивает его надежную фиксацию на моноблоке и заданный угол

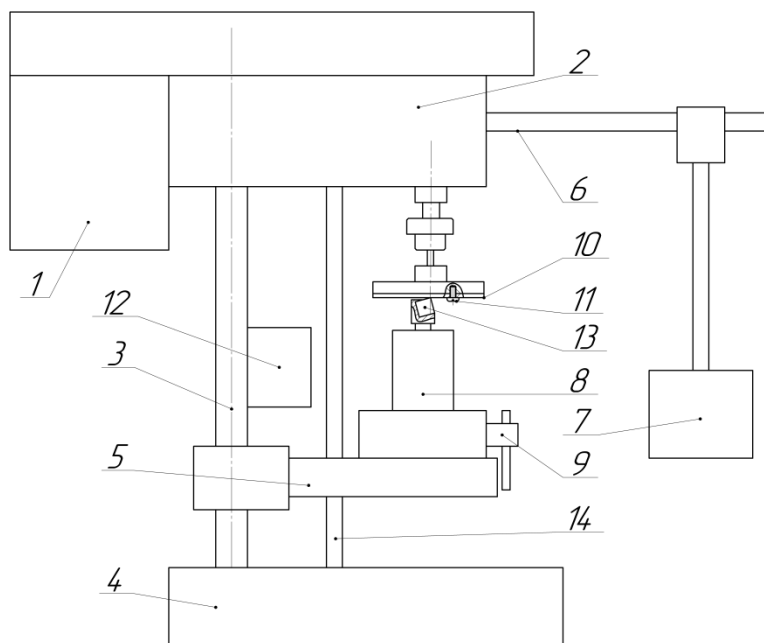


Рис. 3. Устройство для испытания PDC-резцов на абразивное изнашивание:

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 – резец PDC; 14 – стяжка

Fig. 3. Device for abrasive wear tests of the PDC cutters:

1 – electric motor; 2 – spindle unit; 3 – rack; 4 – base; 5 – console table; 6 – lever; 7 – load; 8 – data collection system; 9 – vise; 10 – diamond cutting wheel; 11 – lock; 12 – cooler; 13 – PDC cutter; 14 – screw coupling

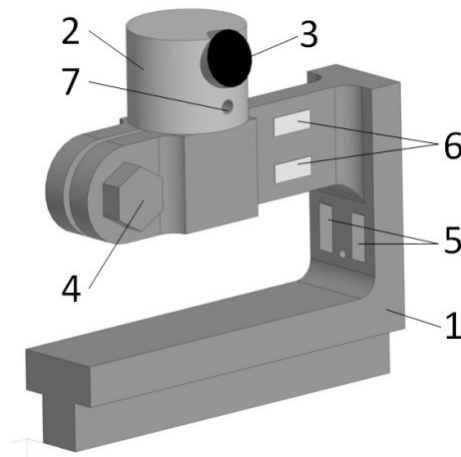


Рис. 4. Измерительный блок без корпуса:

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

Fig. 4. Measuring unit without housing:

1 – monoblock; 2 – mandrel; 3 – PDC cutter; 4 – clamp bolt; 5 – axial load sensors;
6 – friction force sensors (tangential load); 7 – process hole for thermocouple

расположения резца. Для унификации испытаний для всех резцов был принят единый угол 15° ;

4) оправка для контробразца (рис. 5). Позволяет фиксировать алмазный отрезной диск в патроне привода и исключает возможность изгиба алмазного отрезного диска под действием осевой нагрузки. Кроме того, оправка алмазного отрезного диска 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 резцов PDC и, соответственно, повышая достоверность полученных результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На характерной эпюре испытаний на изнашивание по схеме «кромка зубка – алмазный диск», приведенной на рис. 6, видно, что по мере изнашивания резца растет момент трения. При этом возникают осевые и торсионные колебания. Осевые колебания приводят к образованию на поверхности контробразца волнообразного профиля. По завершении испытаний на рабочей кромке резца формируется лыска, схожая по форме с изношенной поверхностью (рис. 7).

Фрактографический анализ поверхностей PDC-резцов, изношенных при эксплуатации (рис. 8) и при лабораторных испытаниях, показали схожий рисунок повреждений в виде ступенчатой структуры, характерной для

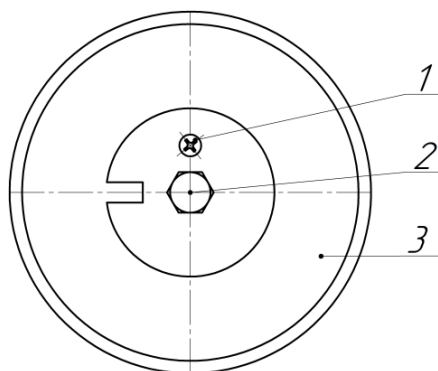


Рис. 5. Оправка для контробразца.

Оправка алмазного отрезного диска:

1 – отверстие под фиксатор; 2 – установленный фиксатор; 3 – алмазный отрезной диск

Fig. 5. Mandrel for counter sample.

Diamond cutting wheel mandrel:

1 – hole for the lock; 2 – installed lock; 3 – diamond cutting wheel

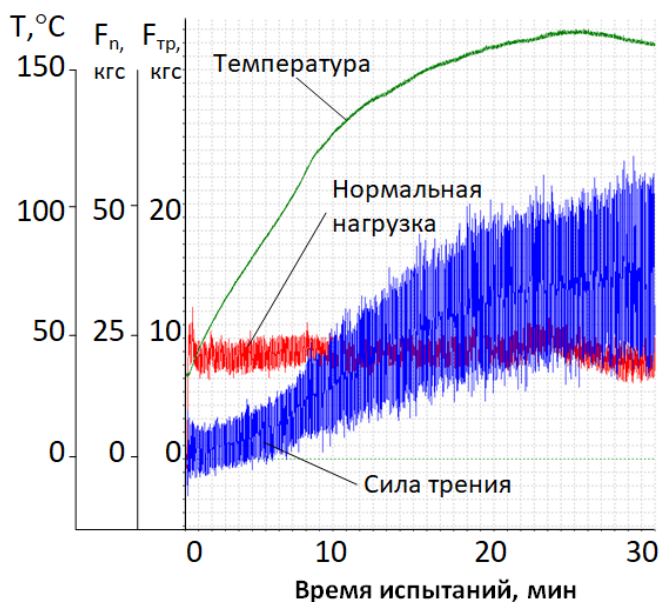
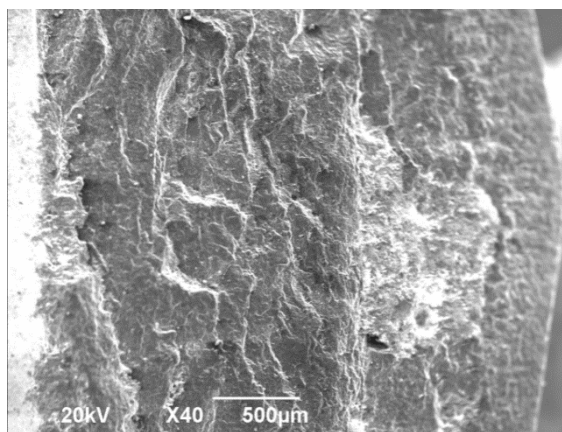


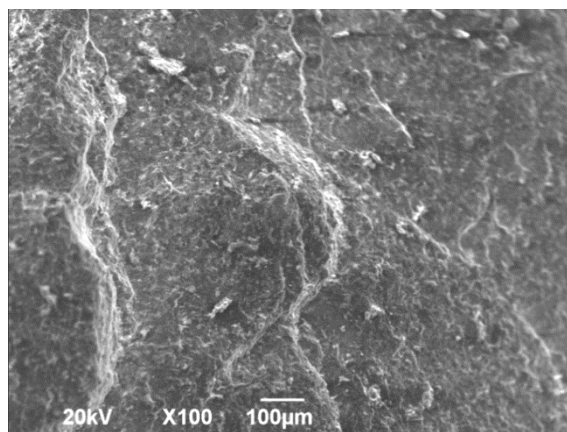
Рис. 6. Характерный вид эюры испытаний PDC-резцов
Fig. 6. Typical view of the PDC cutter test diagram



Рис. 7. Вид изношенной поверхности поликристаллической алмазной пластины
Fig. 7. View of the worn surface of a polycrystalline diamond insert



a



b

Рис. 8. Ступенчатая структура поверхности изнашивания поликристаллической алмазной пластины PDC-резцов:
 при увеличении $\times 40$ (a) и $\times 100$ (b)

Fig. 8. Stepped structure of the wear surface of the polycrystalline diamond insert of PDC cutters: at magnification $\times 40$ (a) and $\times 100$ (b)

усталостного изнашивания. Проведенные исследования PDC-резцов различных партий и классов качества на изнашивание показали, что диапазон скоростей изнашивания составляет от 1 до 11 мг/ч, а скорость изнашивания забоя – от 0,8 до 8 г/ч.

Скорость изнашивания контртела характеризует степень агрессивности резца по отношению к забою. Более агрессивными к металлическому забою оказались резцы с меньшим содержанием пластичной кобальтовой связи.

Интересен также комплексный параметр, характеризующий эффективность резца при трении – количество снятого забоя (в мг), приходящееся на 1 мг весового износа режущей кромки резца.

На основе проведенных исследований предложен критерий, позволяющий относить резцы к одной из четырех групп эксплуатационных свойств по износостойкости, приведенный в таблице 1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты апробации разработанного лабораторного триботехнического комплекса на PDC-резцах различных партий показали, что испытания на новом оборудовании позволяют достаточно быстро получать данные о скорости изнашивания рабочих кромок 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 них 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, использование вторых из которых имеет значительное преимущество в экономическом плане.

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

Изучение процессов обработки материалов с использованием алмазных отрезных дисков нередко требует разработки специализированных устройств для

оптимальной работы инструмента. Одним из ключевых элементов такого устройства является оправка, которая обеспечивает надежную фиксацию алмазного отрезного диска и PDC-резца. При этом важно учитывать, что конструкция оправки должна предотвращать изгиб диска под воздействием осевой нагрузки и обеспечивать правильный угол расположения резца.

Полученные результаты показывают, что разработанные методики испытаний PDC-резцов на изнашивание и оборудование могут использоваться для дифференциации резцов по стойкости к изнашиванию.

Система управления качеством алмазных и матричных долот требует совершенствования методов входного контроля стойкости PDC-резцов к эксплуатационным разрушающим факторам. Для эффективного входного контроля стойкости PDC-резцов к изнашиванию необходимо обеспечить не только адекватность результатов испытаний, но и оперативность испытаний при отсутствии лишних затрат. Для этого в СамГТУ было разработано специальное лабораторное оборудование. Для ускорения испытаний на изнашивание предложено использовать в качестве контртела металл-алмазный забой в виде алмазосодержащего обода алмазного отрезного диска. 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. Для испытаний PDC-резцов рекомендуется брать круги с твердой связкой (6600 МПа по Виккерсу). Это снизит скорость изнашивания алмазного обода и позволит использовать один диск дважды: сначала с одного торца, затем с другого. При этом не происходит засаливания диска. Испытываемая кромка PDC-резца эффективно удаляет слой металла и вскрывает новые алмазные зерна. Кроме того, с повышением твердости контртела увеличивается давление в контакте резца с металл-алмазным забоем при трении. Это создает условия для форсирования испытаний на изнашивание.

Рекомендуемая нагрузка на фрикционный контакт составляет 20 кгс (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.

Таблица 1. Классификация PDC-резцов по стойкости к абразивному истиранию
Table 1. Classification of PDC cutters by abrasion resistance

Группа эксплуатационных свойств резца по износостойкости	Скорость изнашивания резца, мг/ч
1	<2
2	2...4
3	4...6
4	>6

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 соответствует моменту трения 3,6...4,2 Н·м. Для реализации такого усилия рекомендуется использовать привод мощностью не менее 400 Вт. Для испытаний привод можно реализовать на базе вертикально-сверлильных станков с дополнительным их оснащением рычажной системой нагружения.

Аналогично в ОАО «Волгабурмаш» практиковались методы оценки стойкости зубков к истиранию, при которых на токарный станок устанавливали гранитную заготовку и точили ее специальным резцом, где вместо сменной режущей пластины устанавливали испытуемый зубок так, чтобы его режущая кромка располагалась на месте режущей кромки резца. Таким образом, происходила имитация работы зубка на забое. Недостатками данного метода являются длительность и высокая стоимость испытаний. 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 каменной пыли, и, так как это негативно сказывается на здоровье и безопасности человека, требуется отдельное помещение. Кроме того, пыль может оседать на производственных линиях, оборудовании и готовой продукции, что приводит к браку, ухудшению качества, необходимости дополнительной очистки и, как следствие, к увеличению затрат.

В руководстве, разработанном компанией ООО «ПетроИнжиниринг», предлагается методика определения целесообразности дальнейшей эксплуатации PDC-долота в промысловых условиях, в основу которой легли наблюдения за износом сотен долот в месторождениях Западной Сибири и анализ эксплуатационной документации (дефектоскопических актов, карточек обработки долот, ремонтных смет), а также экспертные мнения профильных специалистов различных компаний². Данная технология достаточно всеобъемлюща и предлагает оценивать не только пригодность долота к дальнейшей работе по назначению, но и на основании экономических расчетов 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 резбы. 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 отработку долота следует завершить до принятия решения о целесообразности его восстановления или утилизации. Надо отметить практичность и экономическую обоснованность данного руководства, но не любое повреждение резца следует считать основанием для его замены с учетом того, что это самая дорогостоящая статья ремонта. При этом также не всегда учитываются особенности геологического разреза.

В методике, принятой в НПП «Буринтех», долота считаются непригодными и подлежат отбраковке в следующих случаях: 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; при значительном разрушении одного или нескольких резцов³. Данные рекомендации также не отличаются однозначной четкостью для использующего их оператора с недостаточным опытом.

Рассмотренные подходы к анализу износа вооружения основаны на изучении уже имеющихся повреждений, но как подойти к прогнозированию работоспособности вооружения долот? Для ответа на этот вопрос существуют различные модели прогнозирования [16; 17], включая методы, основанные на использовании искусственного интеллекта. Так, в работе [18] предложена двухступенчатая нейросетевая модель, которая на первой ступени оценивает скорость бурения, а на второй – прогнозирует процент поломок PDC-резцов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведение испытаний на лабораторном триботехническом комплексе на PDC-резцах различных партий позволило получить важные данные о скорости изнашивания рабочих кромок. Результаты апробации показали, что диапазон скоростей изнашивания варьируется от 1 до 11 мг/ч. Важно отметить, что скорость изнашивания забоя колеблется от 0,8 до 8 г/ч. Эти результаты говорят об эффективности нового оборудования для быстрого и точного измерения износа PDC-резцов в процессе работы.

Разработаны методики и оборудование для лабораторных испытаний PDC-резцов на изнашивание при трении об алмазосодержащий металлический забой, которые можно использовать для входного контроля качества партии PDC-резцов, поступающих на сборку алмазных буровых долот. Исследования, проведенные на основе полученных данных, позволили выработать критерий классификации резцов по их износостойкости. Благодаря предложенному критерию, возможно более точно определять категорию износостойкости резцов,

² Мясников Я.В., Ионенко А.В., Гаджиев С.Г., Липатников А.А., Леонов Е.Г. Как правильно дать оценку износа долот типа PDC в промысловых условиях? // Сфера нефть и газ: официальный сайт. URL: <https://cсферанефтегаз.pdf/iscpetro-2014-5/>.

³ Рекомендации по оценке износа долот PDC // Научно-производственное предприятие Буринтех: официальный сайт. URL: <https://burintekh.ru/upload/iblock/871/r817xkl9kjc04qil3qut25rpf3pmf8lh.pdf>.

что, в свою очередь, способствует повышению эффективности производственных процессов. Рекомендовано кроме износа PDC-резцов оценивать также износ контртела, характеризующего работоспособность резца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Нескоромных В.В., Попова М.С., Парахонько Е.В. Разработка породоразрушающего инструмента с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 2. С. 131–138. DOI: [10.18799/24131830/2020/2/2499](https://doi.org/10.18799/24131830/2020/2/2499).
- Ненасhev М.В., Ибатуллин И.Д., Журавлев А.Н., Косулин С.И. Технические средства и методики входного контроля качества PDC зубков алмазных буровых долот // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-3. С. 835–838. EDN: [PCLSTT](https://elibrary.ru/pclstt).
- Konyashin I., Zaitsev A.A., Sidorenko D. et al. On the mechanism of obtaining functionally graded hard-metals // Materials Letters. 2017. Vol. 186. P. 142–145. DOI: [10.1016/j.matlet.2016.09.130](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.130).
- Богомолов Р.М., Сериков Д.Ю. Совершенствование вооружения шарошечного бурового долота // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018. № 5. С. 24–28. DOI: [10.30713/1999-6934-2018-5-24-28](https://doi.org/10.30713/1999-6934-2018-5-24-28).
- Васильев А.А., Сериков Д.Ю., Близиуков В.Ю. Совершенствование буровых долот различных типов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 6. С. 28–31. DOI: [10.30713/0130-3872-2019-6-28-31](https://doi.org/10.30713/0130-3872-2019-6-28-31).
- Нескоромных В.В., Попова М.С., Комаровский И.А., Баочанг Л. Резцы PDC с вогнутой поверхностью режущей грани // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 4. С. 181–192. DOI: [10.18799/24131830/2022/4/3488](https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3488).
- Третьяк А.А., Кривошеев К.В. Выигрышная комбинация расположения резцов PDC на породоразрушающем инструменте // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2025. № 3. С. 36–40. EDN: [NCPITK](https://elibrary.ru/ncpitr).
- Bellin F., Dourfaye A., King W., Thigpen M. 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 // World Oil. 2010. P. 41–46.
- 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. DOI: [10.17122/ngdelo-2024-6-53-62](https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-6-53-62).
- Куфтырев Р.Ю., Полушин Н.И., Котельникова О.С., Лаптев А.И., Сорокин М.Н. Износостойкость PDC режущих элементов, применяемых для комплектации PDC буровых долот // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 9. С. 745–751. DOI: [10.17073/0368-0797-2017-9-745-751](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-9-745-751).
- Трушкин О.Б., Акчурин Х.И. Давление резцов PDC на пластично-хрупкую горную породу в процессе ее разрушения // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 448–453. DOI: [10.31897/PMI.2020.4.7](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.7).
- Kanyanta V., Ozbayraktar S., Mawaja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2014. Vol. 45. P. 147–152. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2014.03.009](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.03.009).
- Moseley S.G., Bohn K.P., Goedickemeier M. Core drilling in reinforced concrete using polycrystalline diamond (PDC) cutters: wear and fracture mechanisms // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2009. Vol. 27. № 2. P. 394–402. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2008.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.11.014).
- Борисов К.И., Рубцов В.Л. Аналитическое исследование временной прочностной характеристики горной породы при резании-скалывании резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. № 1. С. 172–178. EDN: [SITAEP](https://elibrary.ru/sitaep).
- Yahiaoui M., Gerbaud L., Paris J.-Y., Denape J., Dourfaye A. A study on PDC drill bits quality // Wear. 2013. Vol. 298–299. P. 32–41. DOI: [10.1016/j.wear.2012.12.026](https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.026).
- Ahmed O.S., Adeniran A.A., Samsuri A. Computational intelligence based prediction of drilling rate of penetration: a comparative study // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 172. P. 1–12. DOI: [10.1016/j.petrol.2018.09.027](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.09.027).
- Zhao Y., Noorbakhsh A., Koopialipoor M., Azizi A., Tahir M.M. A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration during drilling operations // Engineering with Computers. 2019. Vol. 3. P. 587–595. DOI: [10.1007/s00366-019-00715-2](https://doi.org/10.1007/s00366-019-00715-2).
- Третьяк А.А., Кузнецова А.В., Борисов К.А. Определение поломок резцов PDC с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 5. С. 169–177. DOI: [10.18799/24131830/2019/5/275](https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/275).

REFERENCES

- Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Parakhonko E.V. Development of rock cutting tool with PDC cutters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 131–138. DOI: [10.18799/24131830/2020/2/2499](https://doi.org/10.18799/24131830/2020/2/2499).
- Nenashev M.V., Ibatullin I.D., Zhuravlev A.N., Kosulin S.I. Engineering tools and methods of PDC bits entrance quality control. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4-3, pp. 835–838. EDN: [PCLSTT](https://elibrary.ru/pclstt).
- Konyashin I., Zaitsev A.A., Sidorenko D. et al. On the mechanism of obtaining functionally graded hard-metals. *Materials Letters*, 2017, vol. 186, pp. 142–145. DOI: [10.1016/j.matlet.2016.09.130](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.130).
- Bogomolov R.M., Serikov D.Yu. Improvement of the cutting structures of the rolling cutter drill bits. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2018, no. 5, pp. 24–28. DOI: [10.30713/1999-6934-2018-5-24-28](https://doi.org/10.30713/1999-6934-2018-5-24-28).
- Vasilev A.A., Serikov D.Yu., Bliznyukov V.Yu. Improvement of drill bits of different types. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*,

- 2019, no. 6, pp. 28–31. DOI: [10.30713/0130-3872-2019-6-28-31](https://doi.org/10.30713/0130-3872-2019-6-28-31).
6. Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Komarovskiy I.A., Baochang L. Concave PDC cutter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 181–192. DOI: [10.18799/24131830/2022/4/3488](https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3488).
7. Tretyak A.A., Krivosheev K.V. Winning combination of PDC cutter arrangement on a rock-destructing tool. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU*, 2025, no. 3, pp. 36–40. EDN: [NCPITK](https://nscipitk.ru).
8. Bellin F., Dourfaye A., King W., Thigpen M. 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. *World Oil*, 2010, pp. 41–46.
9. Kolibasov V.A., Ibatullin I.D., Parfenov K.V., Gordeeva E.S. Development of procedure and device for abrasion test of PDC cutters. *Neftegazovoe delo*, 2024, vol. 22, no. 6, pp. 53–62. DOI: [10.17122/ngdelo-2024-6-53-62](https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-6-53-62).
10. Kuftyrev R.Y., Polushin N.I., Kotel'nikova O.S., Laptev A.I., Sorokin M.N. Wear resistance of polycrystalline diamond cutters for drill bits. *Steel in Translation*, 2017, vol. 47, no. 9, pp. 594–598. DOI: [10.3103/S096709121709008X](https://doi.org/10.3103/S096709121709008X).
11. Trushkin O.B., Akchurin Kh.I. PDC cutter pressure on plastic-brittle rock in the process of its destruction. *Journal of Mining institute*, 2020, vol. 244, pp. 448–453. DOI: [10.31897/PMI.2020.4.7](https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.7).
12. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 45, pp. 147–152. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2014.03.009](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.03.009).
13. Moseley S.G., Bohn K.P., Goedickemeier M. Core drilling in reinforced concrete using polycrystalline diamond (PDC) cutters: wear and fracture mechanisms. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, vol. 27, no. 2, pp. 394–402. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2008.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.11.014).
14. Borisov K.I., Rubtsov V.L. Analytical investigation of rock temporal strength property at PDC cutting. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 172–178. EDN: [SITAEP](https://sitaep.ru).
15. Yahiaoui M., Gerbaud L., Paris J.-Y., Denape J., Dourfaye A. A study on PDC drill bits quality. *Wear*, 2013, vol. 298–299, pp. 32–41. DOI: [10.1016/j.wear.2012.12.026](https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.026).
16. Ahmed O.S., Adeniran A.A., Samsuri A. Computational intelligence based prediction of drilling rate of penetration: a comparative study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 172, pp. 1–12. DOI: [10.1016/j.petrol.2018.09.027](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.09.027).
17. Zhao Y., Noorbakhsh A., Koopialipoor M., Azizi A., Tahir M.M. A new methodology for optimization and prediction of rate of penetration during drilling operations. *Engineering with Computers*, 2019, vol. 3, pp. 587–595. DOI: [10.1007/s00366-019-00715-2](https://doi.org/10.1007/s00366-019-00715-2).
18. Tretyak A.Ya., Kuznetsova A.V., Borisov K.A. Determination of PDC cutter breakdowns using regression and neural network modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 169–177. DOI: [10.18799/24131830/2019/5/275](https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/275).

Development of a laboratory tribotechnical facility for testing PDC cutters for wear

Vladimir A. Kolibasov^{*1}, postgraduate student,

assistant of Chair “Machinery and Equipment of Petroleum and Chemical Production”

Ildar D. Ibatullin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,

Head “Chair of Machinery and Equipment of Petroleum and Chemical Production”

Vladislav A. Novikov², PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Metal Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials”,

senior researcher of the Laboratory of X-ray Diffractometry, Electron and Probe Microscopy

Samara State Technical University, Samara (Russia)

^{*}E-mail: mahp@samgtu.ru,
csstea@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0503-2533>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8052-305X>

Received 10.02.2025

Revised 25.02.2025

Accepted 11.03.2025

Abstract: In the practice of drilling oil and gas wells with diamond bits equipped with PDC cutters, cutter quality non-compliance with the declared class occurs. At the same time, the currently used methods of full-scale testing, when granite stone is used as a counterbody, are time-consuming and expensive, which complicates their use for prompt incoming inspection of new batches of PDC cutters arriving for assembly of diamond bits. This necessitated the development of a laboratory tribotechnical facility for quantitative assessment of the ability of PDC cutters to resist abrasion against abrasive materials. The study covers the development of a specialized tribotechnical facility that allows testing PDC cutters of various sizes for wear during friction against a diamond-containing metal work face, for which it is proposed to use diamond cutting wheels. The developed laboratory tribotechnical facility includes: an electromechanical rotary drive (a drilling-and-milling machine); a measuring unit with sensors for normal loads, friction force and temperature of cutter self-heating dur-

ing testing; a lever loading mechanism; a set of mandrels for the possibility of installing PDC cutters of various sizes; a data collection system and licensed software. The results of practical evaluation of the developed laboratory tribotechnical facility on PDC cutters of various batches showed that testing on the new equipment allows for quick collection of data on the wear rate of the working edges of PDC cutters. The developed methods, equipment and criteria can be used to certify the wear resistance of PDC cutters.

Keywords: diamond bit; PDC cutter; tribotechnical facility; diamond-containing metal work face.

For citation: 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, pp. 9–19. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-1-71-1.