

# Инструмент, порошки, пасты

---

УДК 621.91.02:621

**Н. А. Бондаренко**

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля

НАН Украины, г. Киев, Украина

*bond@ism.kiev.ua*

## **Высокоэффективный алмазный инструмент ИСМ для бурения нефтяных и газовых скважин. Обзор**

*Проанализированы работы по исследованию алмазного инструмента для бурения нефтяных и газовых вертикальных и наклонно-направленных скважин. Приведена сравнительная оценка эксплуатационных характеристик бурового алмазного инструмента различного функционального назначения при бурении скважин в мягких и средней твердости породах. Проведено сравнение породоразрушающих инструментов различного конструктивного исполнения, оснащенных новыми термостойкими и износостойкими композиционными алмазосодержащими материалами, с аналогичными инструментами более ранних версий. Обсуждены основные причины преждевременного износа инструмента при бурении средних и твердых пород при повышенных скоростях. Определены перспективные направления в области создания и применения алмазного бурового инструмента.*

**Ключевые слова:** *породоразрушающий инструмент, профиль, бурение, скважина, композиционный алмазосодержащий материал, износостойкость, проходка, механическая скорость.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

При бурении нефтяных и газовых скважин основным способом разрушения горных пород является механический. Существует несколько видов бурения: сплошное, колонковое, бурение для расширения ствола скважины, для выполнения в скважине спецработ и др. Неотъемлемая часть технологии – использование буровых долот, которые можно разделить по назначению: для бурения крепких, твердых, средней твердости и мягких пород.

Начиная с 1923–1925 гг. в практику бурения входят лопастные долота, наплавленные различными сверхтвердыми материалами. В 1936 г. эпизодически [1], а с 1938 г. в основном для бурения глубоких скважин стали приме-

няться трехлопастные долота [2]. Для уменьшения контактной площади долота с породой в 1933 г. предложена конструкция гребенчатых долот [3]. В литературе употребляются различные термины, характеризующие особенность конструкции таких долот: гребенчатые [3], с выемками на режущих кромках [4], с уменьшенной длиной кромки [5]. Одним из первых с научной точки зрения рассмотрел работу долот режущего типа В. С. Федоров [6–12]. В 1966 г. в Институте сверхтвердых материалов АН УССР (ныне Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (ИСМ)) начались работы по созданию долот режущего типа, оснащенных композиционными алмазосодержащими материалами (КАМ) [13, 14] для проходки на больших глубинах. В результате этих работ был создан новый класс алмазного инструмента ИСМ для бурения глубоких нефтяных и газовых скважин [15, 16]. В 1967–1976 гг. в СССР с использованием такого инструмента было пробурено около 3 млн. м глубоких скважин.

Современный буровой инструмент должен обеспечивать сооружение в горном массиве цилиндрической выработки заданных геометрических размеров при минимальных затратах. Для обоснования выбора материалов рабочих элементов породоразрушающей части инструмента необходима информация об их свойствах. Стандартные характеристики инструментальных материалов приводятся во многих справочниках [17–19], монографиях [20–27], а конструктивные встречаются значительно реже [4, 28–30]. Это связано с тем, что до сих пор условия взаимодействия инструмента с породой при бурении изучены недостаточно. Наиболее значительные научные и практические результаты по бурению алмазным инструментом получены в [10, 28–33].

Для изготовления породоразрушающих элементов буровых долот применяют КАМ на основе твердосплавных матриц и алмазно-твердосплавные пластины (АТП) [19, 28, 29, 33]. Композиты системы алмаз–WC–Co используют для оснащения инструментов различного функционального назначения. В промышленных условиях их изготавливают из шихты, состоящей из смеси частиц природного или синтетического алмаза зернистостью 800/630–1000/800 с менее крупными частицами карбида вольфрама и кобальта. Методы получения композитов алмаз–WC–Co приведены в [33–37]. Физико-механические свойства этих КАМ обусловлены составом, структурой и морфологией, которые, в свою очередь, зависят от свойств их составляющих, способов и режимов спекания. Изучению структуры и свойств данных КАМ посвящены монографии [28–30, 33, 37], обзорные статьи [38–40]. Наиболее значительные научные и практические результаты по формированию структуры с улучшенными механическими характеристиками КАМ получены в [41–54]. Следует отметить, что некоторые важные свойства КАМ изменяются в зависимости от силовых параметров разрушения породы [55], контактных температур [56–59], напряженно-деформированного состояния матрицы [60, 61], а также размещения породоразрушающих вставок на рабочей поверхности инструмента [62]. Использование этих композитов ограничено недостаточной износостойкостью при бурении прочных горных пород.

Для повышения механической скорости и износостойкости инструмента рядом зарубежных фирм были разработаны поликристаллические алмазные (Polycrystalline Diamond – PCD) пластины (аналог АТП в ИСМ), которые состоят из алмазного поликристаллического слоя и твердосплавной подложки [63–67]. Их изготавливают спеканием в условиях высоких давлений (6–

9 ГПа) и температур (1350–1900 °С) при различном времени выдержки с использованием порошков синтетического алмаза зернистостью 40/28 [68–74]. Толщина алмазного слоя в АТП составляет 1–2 мм, а твердосплавной подложки (диаметром 13–19 мм) – 9–16 мм.

В результате поиска способов повышения износостойкости алмазных инструментов было выявлено ряд важных факторов, влияющих на свойства АТП [40, 75–84]:

- износостойкость и надежная работа бурового инструмента определяется термостойкостью АТП и уровнем остаточных напряжений как в алмазном слое, так и в твердосплавной подложке;

- термостойкость АТП существенным образом зависит от содержания кобальта и ковалентных соединений в алмазном слое;

- использование в составе исходных веществ карбида кремния, диборида хрома и нитрида ванадия препятствует диффузии кобальта из твердосплавной подложки в алмазный слой;

- оказалось возможным для кобальта, карбида кремния, диборида хрома и нитрида ванадия, как материалов связи в рабочем слое композита, найти способ повышения термостойкости и некоторых механических свойств АТП.

На сегодняшний день в мире насчитывается более трех десятков компаний, занимающихся разработкой и производством бурового инструмента. Ведущее место принадлежит компаниям “Varel International”, “Hughes Christensen”, “Hallburton”, “Smith Bits”, “Reed Hycalod”, “National Oilwell Varco”, “Schlumberger”, “Reed Tools Company”, “Baker Hughes” и “GemDrill”. Эти компании поставляют инструменты более чем в 86 стран. В Украине основным производителем бурового инструмента является ИСМ НАН Украины, в России – ООО “ПетроТул”, ООО “Викинг”, ООО НПП “Буринтех” и ООО “Волгобурмаш”. При создании бурового инструмента основное внимание уделяют обеспечению надежности, износостойкости и высокой производительности. Буровые инструменты ИСМ – универсальные и высококачественные, имеют соответствующую маркировку. В Украину инструмент для буровых работ поставляют многие зарубежные производители, в основном из США, Европы и Китая. Следует заметить, что качество долот ИСМ не уступает импортным, а их стоимость значительно ниже.

Повышение технико-экономических показателей бурения нефтяных скважин должно осуществляться в направлении совершенствования каждого звена в технологической цепочке. При этом одной из основных задач является не только создание КАМ и АТП с высокими механическими и эксплуатационными характеристиками, но и совершенствование существующих и разработка новых конструкций инструмента.

Это связано с тем, что износ бурового долота существенно зависит от формы профиля и расположения буровых вставок на рабочей поверхности, степени их оснащенности, условий бурения. От этих параметров зависит надежность и производительность инструмента. Несмотря на многообразие конструкций долот, до сих пор не существует единых рекомендаций оптимальной формы профиля и степени их оснащенности для различных условий бурения.

Цель настоящей работы – проведение анализа опубликованных результатов исследований конструктивных и эксплуатационных особенностей алмазных инструментов, используемых для бурения нефтяных и газовых скважин и определение перспективных путей развития этого направления.

## КОНСТРУКЦИИ БУРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ, ОСНАЩЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫМИ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Как указано выше, ИСМ является крупнейшим украинским разработчиком и производителем алмазного инструмента для бурения нефтяных скважин, оснащаемого АТП и КАМ, а также их комбинацией. Применение инструмента ИСМ позволяет на порядок и более повысить проходку по сравнению шарошечными инструментами и снизить затраты на спускоподъемные операции [19, 28, 29]. При этом одной из основных задач является не только создание износостойких КАМ, но и совершенствование существующих и разработка новых конструкций бурового инструмента.

### Алмазные долота PCD

Буровые долота предназначены для бурения мягких и средней твердости пород сплошным забоем вертикальных и наклонно-направленных скважин с промывкой забоя буровым раствором (рис. 1, а, б).



Рис. 1. Алмазные долота производства ИСМ (а–в), “Varel” (г), “Hughes Christensen” (д, е) для бурения нефтяных и скважин.

Для бурения с одновременным расширением вертикальных и наклонно-направленных скважин с промывкой забоя буровым раствором используют бицентричные долота (см. рис. 1, в). Долота данной серии имеют сбалансированную структуру оснащения, что снижает износ породоразрушающих вставок и обсадных колонн при разбуривании оснастки. Рабочая часть бу-

ровых долот оснащена АТП диаметром 13,5 мм и вставками из славутича. Промывка забоя осуществляется через центральное отверстие. Использование АТП [74, 80] и КАМ [43–45] повышенной износостойкости позволяет увеличить скорость проходки на 30 % и износостойкость долот на 40 % по сравнению с долотами более ранних версий. Следует отметить, что по технико-экономическим показателям разработанные долота не уступают аналогичным долотам фирм “Varel” (см. рис. 1, *з*) и “Hughes Christensen” (см. рис. 1, *д, е*).

### Бурильные головки АТП

Бурильные головки предназначены для бурения нефтяных и газовых скважин с отбором керна в мягких породах и породах средней твердости с промывкой забоя буровым раствором с высокими механическими скоростями (рис. 2, *а*). Подача промывочной жидкости к забою осуществляется через центральное отверстие и дополнительные наклонные каналы, выведенные между лопастями. Бурильные головки, армированные новыми АТП [74, 80] и КАМ [43–45], позволяют эффективно выполнять бурение при ограниченных крутящих моментах и малой гидравлической мощности. Они также подходят для условий, где состояние бурового оборудования не позволяет выйти на оптимальные режимы.

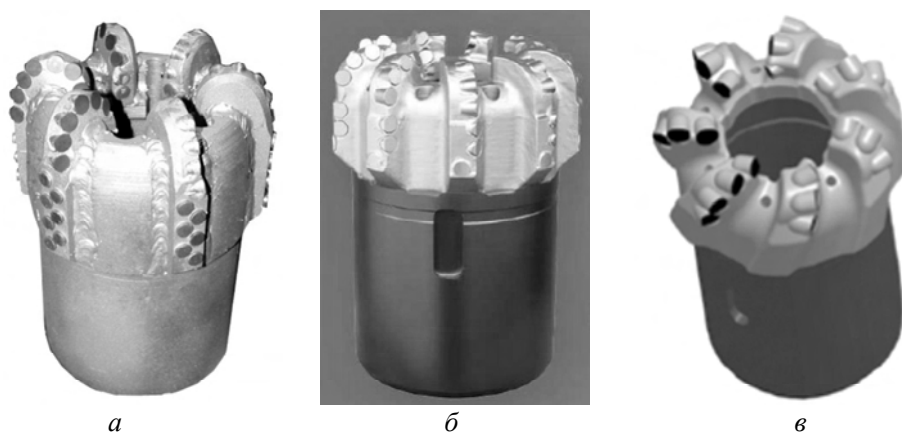


Рис. 2. Бурильные головки производства ИСМ (*а*), СП ЗАО “Удол”, Россия (*б*) и фирмы “Varel” (*в*) для бурения глубоких скважин.

В настоящее время в ИСМ на основе новых АТП и КАМ разработаны бурильные головки различных размеров, которые используются в Украине и в странах ближнего зарубежья.

### Алмазные долота истирающего типа

Данный вид инструмента эффективен при бурении вертикальных и наклонно-направленных нефтяных и газовых скважин сплошным забоем в твердых и крепких горных породах VII–XI категории твердости и до XII категории по абразивности. Бурильные долота истирающего типа, в отличие от долот режущего типа, оснащаются КАМ на основе славутича (рис. 3, *а*). Бурение этими долотами производится как в роторном, так и в турбинном режиме с промывкой забоя буровым раствором. Преимуществом таких долот являются их значительная проходка, достигающая нескольких сотен метров, и относительно высокая рейсовая скорость; выпускаются диаметром от 112 мм до

393,9 мм. Использование специально разработанных буровых вставок на основе смесей  $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co-CrB_2-W_2B_5)$  [43–45] и конструктивных решений, выполненных в этих долотах, позволяет увеличить скорость проходки на 40–45 % и износостойкость на 50–60 % по сравнению с долотами более ранних версий.

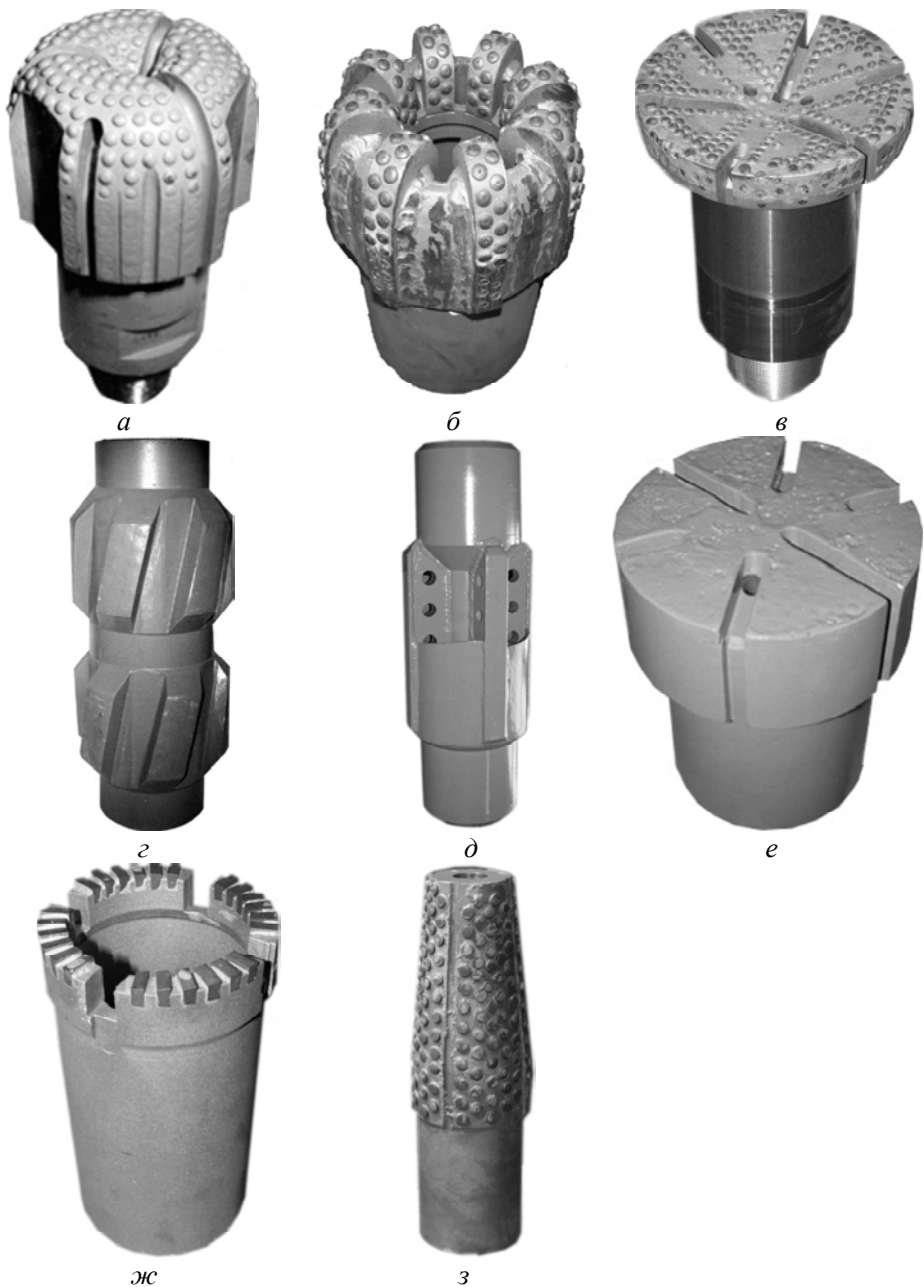


Рис. 3. Буровые долота (а) и бурильная головка (б) истирающего типа, резное долото (в), калибратор (г), металлоулавливатель-калибратор (д), инструменты для ликвидации аварий в процессе бурения нефтяных и газовых скважин (е–ж).

## Бурильные головки

Такой инструмент предназначен для бурения нефтяных и газовых скважин с отбором керна в породах средней твердости и твердых с пропластками крепких в роторном и турбинном режимах бурения. Бурильная головка имеет сварную конструкцию, состоящую из стального корпуса и 6–8 лопастей (см. рис. 3, б). Бурильная головка обеспечивает качественную обработку кернового материала и высокий (95–100 %) процент его выноса на поверхность. Торцевая и кернокалибрующая части инструмента оснащаются породоразрушающими вставками, полученными на основе тех же алмазосодержащих смесей, что и буровые долота.

## Зарезные долота

Долота зарезные предназначены для зарезки боковых стволов скважин при бурении мягких и средней твердости пород в аварийных ситуациях с промывкой забоя промывочной жидкостью или буровым раствором. Долото состоит из фрезерованного стального корпуса, оснащается породоразрушающими вставками славутич (см. рис. 3, в). Для увеличения скорости проходки при бурении скважин в породах средней твердости такие долота оснащаются породоразрушающими вставками, полученными горячим прессованием смесей  $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co-CrB_2-W_2B_5)$  [43–45]. Внутренняя рабочая поверхность долота выполнена с конусностью  $150^\circ$  для улучшения управляемости и надежности центрирования на забое.

## Калибраторы

Калибраторы это калибрующие и опорно-центрирующие устройства, предназначенные для калибрования ствола скважины, центрирования и улучшения условий работы долота и забойного двигателя. Такие инструменты устанавливаются в колонне буровых труб и (или) над долотом, используются при турбинном и роторном бурении пород средней твердости и твердых абразивных пород. Калибратор состоит из фрезерованного стального корпуса. Особенностью калибраторов ИСМ является то, что они имеют два яруса прямолинейных или спиральных лопастей, что исключает возможность прихвата во время бурения и поршневания при спуско-подъемных операциях. Оснащение калибраторов ИСМ осуществляется буровыми вставками из твесала, а заходные части лопастей – вставками из славутича (см. рис. 3, г), разработанными на основе смесей  $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co-CrSi_2)$  [48], что при сопоставимых значениях алмазоудержания с добавлением  $CrB_2$  обеспечивает, за счет образования в матрице силицидов кобальта, их высокую стойкость и долговечность. Так, средняя стойкость калибраторов ИСМ в твердых абразивных породах составляет 1500 ч, калибраторов с твердосплавным вооружением – 100–150 ч, в породах средней твердости – 7000 ч, с твердосплавным вооружением – 700–1000 ч. Средняя часть калибратора предназначена для захвата под ключ. По желанию заказчика могут быть изготовлены с различными типоразмерами замковой резьбы и наружным диаметром до 400 мм.

## Металлоулавливатели-калибраторы

Такой инструмент предназначен для очистки забоя скважины от металлических предметов, крупных частиц шлама, а также калибрования стенок скважины при бурении средних и твердых пород в роторном и турбинном режимах. Состоит из корпуса и лопастей, которые оснащаются вставками из славутича или твесала (см. рис. 3, д).

## Фрезеры торцевые

Торцевой фрезер предназначен для торцевого разрушения всевозможных посторонних металлических предметов и цементного камня при ремонтно-восстановительных работах в нефтяных, газовых и геологоразведочных скважинах. Состоит из стального корпуса, в верхней части которого нарезана внутренняя замковая резьба. Нижняя (рабочая) часть фрезера армирована твердосплавными зубками и крошкой, которые присоединяются к стальному корпусу с помощью латунного припоя (см. рис. 3, *е*). В армированном слое фрезера предусмотрены промывочные каналы, по которым промывочная жидкость поступает в зону резания. Режущая поверхность фрезера может изготавливаться высотой до 20 мм и имеет плоский профиль.

## Фрезеры кольцевые

Предназначены для разрушения металлических предметов, цементного камня и зацементированных металлических предметов в кольцевом пространстве между стенкой скважины или обсадной колонной и элементами буровой колонны при проведении ремонтно-восстановительных работ в нефтяных, газовых и геологоразведочных скважинах. Фрезер состоит из стального трубчатого корпуса и режущеистерающей матрицы, включающей зубки твердого сплава и частицы дробленого твердого сплава (см. рис. 3, *ж*). Высота рабочего слоя – 15–20 мм. Для легких работ режущую часть оснащают пластинами твердого сплава марки ВК. Верхняя часть корпуса выполнена с фаской под сварку.

## Фрезер-райбер

Данный вид инструмента предназначен для прорезки обсадной колонны с целью забуривания нового ствола при проведении ремонтно-восстановительных работ в нефтяных, газовых и геологоразведочных скважинах. Состоит из стального корпуса, в пазы боковой и торцевой рабочей части которого запаены пластины твердого сплава марки ВК (см. рис. 3, *з*). Подачу бурового раствора осуществляют через боковые промывочные отверстия, равномерно расположенные по высоте рабочей части. Для соединения с бурильной колонной верхняя часть корпуса фрезера выполнена в виде муфты с замковой резьбой.

Как видно из анализа приведенных выше данных, механическая скорость и износостойкость бурового инструмента ИСМ существенно зависит от вооружения, формы профиля, схемы расположения буровых вставок и степени их оснащенности, а также от условий бурения. Ниже проанализированы причины изменения износостойкости различных буровых инструментов и определены перспективные пути для улучшения их механических и эксплуатационных свойств.

## Износ буровых инструментов

На рис. 4 приведены изображения рабочей поверхности алмазных долот АТП ИСМ (*а*, *б*) и фирмы “Smith Bits” (*в–м*) после бурения пород средней твердости сплошным забоем нефтяных вертикальных скважин с промывкой забоя буровым раствором.

Видно, что основными причинами преждевременного износа буровых долот отечественного и зарубежного производства является недостаточная прочность и повышенная хрупкость алмазосодержащего слоя АТП (см.



рис. 4, а, д–ж), низкая прочность твердосплавной подложки (см. рис. 4, з), некачественная пайка АТП с корпусом долота (см. рис. 4, и), а также недостаточная прочность материала лопасти и корпуса долота (см. рис. 4, к, л). Благодаря применению АТП повышенной термостойкости и износостойкости и их рациональному размещению бурение нефтяных и газовых скважин в мягких и средней твердости породах осуществляется с повышенными скоростями до полного износа инструмента (см. рис. 4, б–г, м). Например, проходка бурового долота ИСМ, оснащенного АТП повышенной термостойкости и

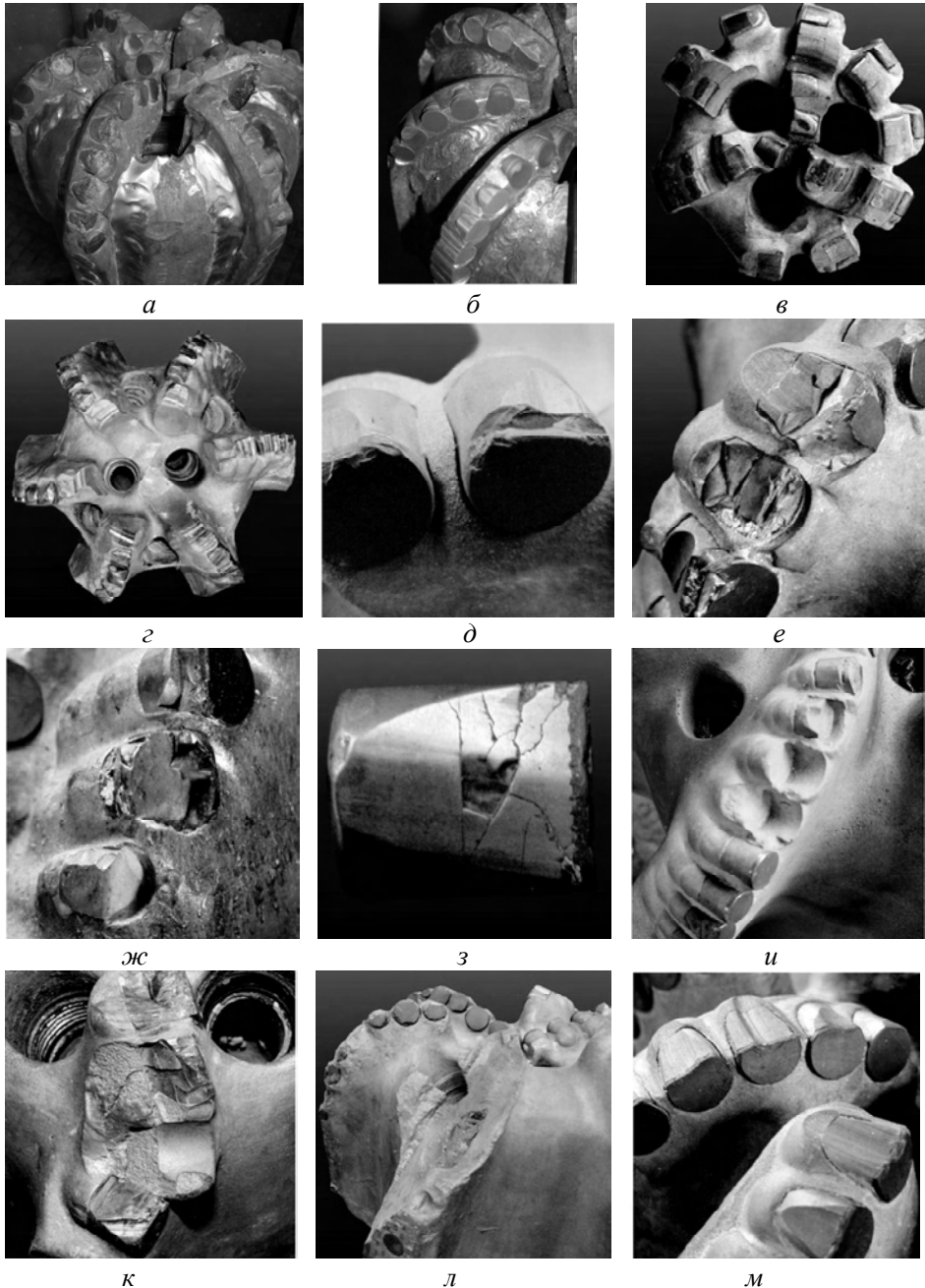


Рис. 4. Рабочие поверхности алмазных долот АТП ИСМ (а, б) и PDC фирмы “Smith Bits” (в–л) после бурения пород с пропластами твердых пород.

износостойкости (см. рис. 4, б) в 2,65 раза превышает аналогичный параметр инструмента оснащенного АТП более ранних версий (см. рис. 4, а). При этом механическая скорость бурения долота, оснащенного АТП повышенной термостойкости, в 2 раза выше аналогичного параметра долота, оснащенного АТП более ранних версий [80]. Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о высокой износостойкости и конкурентоспособности буровых инструментов ИСМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный обзор работ свидетельствует о развитии направлений в области создания и применения бурового инструмента различного функционального назначения:

- разработка новых АТП и КАМ с повышенными механическими и эксплуатационными характеристиками;
- разработка специальных профилей, позволяющих равномерно распределять нагрузку на породоразрушающие вставки.

При создании эффективного алмазного инструмента актуальной остается проблема его стойкости при бурении нефтяных и газовых скважин в твердых породах. Для решения этой проблемы исследователи особое внимание уделяют созданию АТП повышенной термостойкости из композитов  $C_{\text{алмаз}}-(WC-Co)$  с добавками тугоплавких соединений переходных металлов. Для развития этого направления целесообразно уяснить механизм, способствующий повышению физико-механических свойств этих композитов.

При бурении скважин в твердых породах с высокими скоростями кроме создания термостойких и износостойких композитов существует проблема неравномерного износа породоразрушающих вставок и материала корпуса инструмента. Эффективным методом решения этих проблем является дальнейшее совершенствование и разработка новых конструктивных исполнений профилей, позволяющих равномерно распределять нагрузку на породоразрушающие вставки и эффективно очищать призабойную зону, исключая вторичное перемалывание шлама.

*Проаналізовано роботи з дослідження алмазного інструменту для буріння нафтових і газових вертикальних і похило-спрямованих свердловин. Наведено порівняльну оцінку експлуатаційних характеристик бурового алмазного інструменту різного функціонального призначення при бурінні свердловин в м'яких і середньої твердості породах. Зроблено порівняння породоруйнівних інструментів різного конструктивного виконання, що оснащено новими термостійкими і зносостійкими композиційними алмазовмісними матеріалами, з аналогічними інструментами більш ранніх версій. Обговорено основні причини передчасного зносу інструменту при бурінні середніх і твердих порід при підвищених швидкостях. Визначено перспективні напрямки в області створення і застосування алмазного бурового інструменту.*

**Ключові слова:** породоруйнівний інструмент, профіль, буріння, свердловина, композиційний алмазовмісний матеріал, зносостійкість, проходка, механічна швидкість.

*The publications addressing the diamond tools for drilling oil and gas vertical and controlled directional wells are reviewed. The performance of diamond drilling tools of various functionalities is assessed by drilling in soft and medium hard formations. Rock destruction tools of different designs, which are fitted with novel thermally stable and wear-resistant diamond-containing composites, are compared with similar tools of earlier models. The main factors responsible for premature tool wear in medium and hard formations at increased speeds are discussed. Some promising areas in the development and application of diamond drilling tools are identified.*

**Keywords:** rock destruction tool, profile, drilling, well, diamond-containing composite material, wear resistance, meterage drilled, rate of penetration.

1. Зильберман И. И. Улучшить качество трехперых долотьев // *Азербайджан. нефт. хоз-во.* – 1938. – № 9. – С. 5–16.
2. Удянский Н. Я. Итоги бурения за 1938 год и перспективы на 1939 // *Там же.* – 1939. – № 1. – С. 3–4.
3. Вартанесов И. Л., Чернышев Е. В. О возможности применения в бурении нарезных и гребенчатых долот // *Нефт. хоз-во.* – 1934. – № 5. – С. 28–32.
4. Брэнтли Д. Е. Справочник по роторному бурению. – М.: Недра, 1964. – 583 с.
5. Кулиев С. М., Мдивани А. Г., Мамедов Н. Н. Основы и опыт бурения ступенчатыми долотами. – Баку: Азербайджан. гос. изд-во, 1967. – 194 с.
6. Федоров В. С. Научные основы режимов бурения. – Л.: Гостоптехиздат, 1951. – 248 с.
7. Арцимович Г. В., Эгелес Р. М. Разрушение горных пород при вдавливании неосесимметричного инструмента // *Нефтяное хозяйство.* – 1969. – № 12. – С. 42–43.
8. Федоров В. С., Юзбашев Г. С. Выбор формы и типа долот для вращательного бурения // *Нефть.* – 1931. – № 8. – С. 5–9.
9. Федоров В. С. Долотья для бурения на нефть. – Баку–М.: Азгостоптехиздат, 1941. – 156 с.
10. Финкельштейн Г. М. Исследование процесса бурения глубоких скважин долотами режущего типа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1971.
11. Арцимович Г. В., Скляр Э. Д., Левченко А. Т. Результаты промышленных испытаний долот режущего типа // *Нефтяное хозяйство.* – 1969. – № 2. – С. 31–35.
12. Арцимович Г. В., Скляр Э. Д., Левченко А. Т. и др. Применение лопастных долот с прерывистым лезвием // *Бурение.* – 1971. – № 7. – С. 3–8.
13. Арцимович Г. В. Разработка научных основ создания буровых долот для проходки глубоких нефтяных и газовых скважин / Тез. докл. науч. конф. “Вопросы технического прогресса в нефтяной и газовой промышленности”. – Киев, 1965. – С. 30–32.
14. А. с. 356910 СССР. Способ получения материала / В. Н. Бакуль, Н. П. Билык, Л. И. Бронштейн и др. – Оpubл. 1972, Бюл. № 32.
15. Штернов А. А. Перспективный инструмент большого народнохозяйственного значения // *Синтет. алмазы.* – 1969. – № 4. – С. 26–27.
16. Ларионов А. И. Развитие алмазного способа бурения // *Нефтяное хозяйство.* – 1966. – № 4. – С. 9–11.
17. *Справочник инженера по бурению: В 2 т. / Под ред. В. И. Мишевича, Н. А. Сидорова.* – М.: Недра, 1973. – Т. 1. – 520 с.
18. *Справочник по буровзрывным работам / Под общ. ред. М. Ф. Друкованного.* – М.: Недра, 1976. – 631 с.
19. Масленников И. А., Матвеев Г. И. Инструмент для бурения скважин. Справ. пособие. – М.: Недра, 1981. – 335 с.
20. Алимов О. Д., Дворников Л. Т. Бурильные машины. – М.: Машиностроение, 1976. – 295 с.
21. Бакуль В. Н., Кравцов М. М. Горный инструмент для бурения шпуров. – М. – Харьков: Металлургиздат, 1952. – 282 с.
22. Михайлов В. Г., Крапивин М. Г. Горные инструменты. – М.: Недра, 1970. – 128 с.
23. Бугаев А. А., Лившиц В. И., Иванов В. В. и др. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении. – К.: Наук. думка, 1978. – 232 с.
24. Козловский Е. А., Гафияттулин Р. Х. Автоматизация процесса геологоразведочного бурения. – М.: Недра, 1977. – 215 с.
25. Копылов В. Е. Бурение скважин вне Земли. – М.: Недра, 1977. – 160 с.
26. Ашавский А. М. Основы проектирования оптимальных параметров забойных буровых машин. – М.: Недра, 1966. – 220 с.
27. Москалев А. Н., Сологуб С. Я., Васильев М. М., Молодецкий В. Р. Интенсификация процессов разрушения горных пород. – М.: Недра, 1978. – 208 с.
28. Вовчановский И. Ф. Породоразрушающий инструмент на основе славутича для бурения глубоких скважин. – К.: Наук. думка, 1978. – 210 с.
29. Цыпин Н. В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. – К.: Наук. думка, 1983. – 192 с.
30. Арцимович Г. В. Механофизические основы создания породоразрушающего бурового инструмента. – Новосибирск: Наука, 1985. – 265 с.

31. Арцимович Г. В. Влияние забойных условий и режимов бурения на эффективность проходки глубоких скважин. – Новосибирск: Наука, 1974. – 124 с.
32. Исаев М. И., Пономарев П. В. Основы прогрессивной технологии бурения геолого-разведочных скважин. – М.: Недра, 1975. – 287 с.
33. Бондаренко Н. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Основы создания алмазосодержащих композиционных материалов для породоразрушающих инструментов. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – 456 с.
34. Mizuuchi K., Inoue K., Agari Y. et al. Consolidation and thermal conductivity of diamond particle dispersed copper matrix composites produced by spark plasma sintering (SPS) // J. Japan Inst. Metals. – 2007. – 71, N 11. – P. 1066–1069.
35. Kim H. C., Shon I. J., Jeong I. K. et al. Rapid sintering of ultrafine WC and WC–Co hard materials by high-frequency induction heated sintering and their mechanical properties // Metal Mater. Int. – 2007. – 13, N 1. – P. 39–45.
36. Michalski A., Siemiaszko D. Nanocrystalline cemented carbides sintered by the pulse plasma method // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. – 2007. – 25, N 2. – P. 153–158.
37. Майстренко А. Л. Формирование структуры композиционных алмазосодержащих материалов в технологических процессах. – К.: Наук. думка. – 2014. – 342 с.
38. Бондаренко Н. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Анализ основных теорий спекания материалов. 1. Спекание в изотермических и неизотермических условиях (обзор) // Сверхтв. материалы. – 2005. – № 6. – С. 3–17.
39. Лисовский А. Ф., Бондаренко Н. А. Роль межфазных и контактных поверхностей в формировании структуры и свойств композиции алмаз–(WC–Co). Обзор // Там же. – 2014. – № 3. – С. 3–17.
40. Колодницкий В. Н., Багиров О. В. О формировании структуры композиционных алмазосодержащих материалов, применяемых в буровом и камнеобрабатывающем инструменте (Обзор) // Там же. – 2017. – № 1. – С. 3–26.
41. Симкин Э. С. Исследование сверхтвердых композиционных материалов из синтетических алмазов для бурового инструмента // Физика и техника высоких давлений. – 1987. – Вып. 25. – С. 49–53.
42. Симкин Э. С., Цыпин Н. В. Структура и свойства алмазосодержащих материалов, полученных в условиях высоких давлений // Сверхтв. материалы. – 1989. – № 5. – С. 29–33.
43. Бондаренко Н. А., Новиков Н. В., Мечник В. А. и др. Структурные особенности сверхтвердых композитов системы алмаз–твердый сплав ВК6, отличающихся износостойкостью // Там же. – 2004. – № 6. – С. 3–15.
44. Новиков Н. В., Бондаренко Н. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Влияние диффузии и химических реакций на структуру и свойства буровых вставок. 1. Кинетическое описание систем  $C_{алмаз}$ –ВК6 и  $C_{алмаз}$ –(ВК6–CrB<sub>2</sub>–W<sub>2</sub>B<sub>2</sub>) // Физическая мезомеханика. – 2005. – 8, № 2. – С. 99–106.
45. Бондаренко Н. А., Мечник В. А. Влияние структуры переходной зоны алмаз–матрица на износостойкость и эксплуатационные характеристики бурового инструмента ИСМ // SOCAR Proceedings. – 2011. – Вып. 2. – P. 18–24.
46. Мечник В. А. Закономірності структуроутворення в системі алмаз–Fe–Cu–Ni–Sn–CrB<sub>2</sub> // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 1. – С. 85–92.
47. Новіков М. В., Мечник В. А., Бондаренко М. О. и др. Композиційні матеріали системи алмаз–(Co–Cu–Sn) з поліпшеними механічними характеристиками. Повідомлення 2. Вплив добавки CrB<sub>2</sub> на структуру і властивості композиту алмаз–(Co–Cu–Sn) // Сверхтв. материалы. – 2016. – № 3. – С. 11–27.
48. Лисовский А. Ф., Бондаренко Н. А. Термодинамическое исследование легирования композиции алмаз–WC–Co силицидами переходных металлов // Там же. – 2012. – № 4. – С. 33–37.
49. Багиров О. Э. О применении композиционных материалов алмаз–(WC–Co), легированных CrSi<sub>2</sub> в буровых долотах // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 1. – С. 15–22.
50. Белый А. В., Карпенко Г., Д., Мышкин Н., К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
51. Багиров О. Э. Композиционные материалы алмаз–(WC–Co–NbN) для буровых долот // SOCAR Proceedings. – 2017. – № 2. – С. 13–22.
52. Мечник В. А. Одержання композиційних матеріалів алмаз–(Fe–Cu–Ni–Sn) підвищеної зносостійкості. // Порошк. металлургия. – 2013. – № 9/10. – С. 115–127.

53. Новіков М. В., Мечник В. А., Бондаренко М. О. и др. Композиційні матеріали системи алмаз–(Co–Cu–Sn) з поліпшеними механічними характеристиками. Повідомлення 1. Вплив параметрів гарячої допресовки на структуру і властивості композиту алмаз–(Co–Cu–Sn) // Сверхтв. материалы. – 2015. – № 6. – С. 53–69.
54. Мечник В. А., Бондаренко Н. А., Кузин Н. О., Ляшенко Б. А. Роль структурообразования в формировании физико-механических свойств композитов системы алмаз–(Fe–Cu–Ni–Sn) // Трение и износ. – 2016. – **37**, № 4. – С. 482–490.
55. Александров В. А., Алексеенко Н. А., Мечник В. А. Исследование силовых и энергетических параметров резки гранита алмазными дисковыми пилами // Сверхтв. материалы. – 1984. – № 6. – С. 35–39.
56. Александров В. А., Мечник В. А. Влияние теплопроводности алмазов и коэффициента теплообмена на контактную температуру и износ отрезного круга // Трение и износ. – 1993. – **14**, № 6. – С. 1115–1117.
57. Дутка В. А., Колодницький В. М., Мельничук О. В., Заболотний С. Д. Математична модель теплофізичних процесів при взаємодії породоруйнівних елементів бурових коронок з масивом гірської породи // Сверхтв. материалы. – 2005. – № 1. – С. 67–77.
58. Александров В. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Температурное поле и износ неоднородного алмазного круга при конвективном теплообмене. Ч. 1 // Трение и износ. – 1994. – **15**, № 1. – С. 27–35
59. Александров В. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Температурное поле и износ неоднородного алмазного круга при конвективном теплообмене. Ч. 2 // Там же. – 1994. – **15**, № 2. – С. 196–201.
60. Жуковский А. Н., Майстренко А. Л., Мечник В. А., Бондаренко Н. А. Напряженно-деформированное состояние связки в окрестности алмазного зерна, находящегося под действием нормальной и касательной составляющих нагрузки. Ч. 1. Модель // Там же. – 2002. – **23**, № 3. – С. 146–153.
61. Жуковский А. Н., Майстренко А. Л., Мечник В. А., Бондаренко Н. А. Напряженно-деформированное состояние связки в окрестности алмазного зерна, находящегося под действием нормальной и касательной составляющих нагрузки. Ч. 2. Анализ // Там же. – 2002. – **23**, № 4. – С. 393–396.
62. Свешников И. А., Колодницький В. Н. Оптимизация размещения твердосплавных резцов в корпусе бурового долота // Сверхтв. материалы. – 2006. – № 4. – С. 70–75.
63. Pat. 3141746 USA. Diamond compact abrasive / A. J. De Lai. – Publ. 21.07.64.
64. Pat. 4380471 USA, IPC B22 F3/14. Polycrystalline diamond and cemented carbide substrate and synthesizing process therefore / M. Lee, L. E. Szala, R. E. Tuft. – Publ. 19.04.83.
65. Pat. 4411672 USA, IPC B24 D3/02. Method for producing composite of diamond and cemented tungsten carbide / H. Ishizuka. – Publ. 25.10.83.
66. Шульженко А. А., Гаргин В. Г., Шишкин В. А., Бочечка А. А. Поликристаллические материалы на основе алмаза. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
67. Clark I. E., Bex P. A. The use of PCD for petroleum and mining drilling // Ind. Diamond Rev. – 1999. – N 1. – P. 43–49.
68. Scott D. E. The history and impact of synthetic diamond cutters and diamond enhanced inserts on the oil and gas industry // Ibid. – 2006. – N 1. – P. 48–58.
69. Schell E. J., Phillippi D., Fabian R. T. New stable PDC technology significantly reduces hard rock cost per foot // SPE/IADC Drilling Technical Conf., Amsterdam, The Netherlands, 19–21 Febr., 2003. – Amsterdam: Society of Petroleum Engineers, 2003.
70. Pat. 6220375 USA, IPC E 21 B10/567, B 22 F 7/06, E 21 B 10/16, E 21 B 10/56. Polycrystalline diamond cutters having modified residual stresses / T. N. Butcher, R. M. Horton, S. R. Jurewicz et al. – Publ. 24.04.2001.
71. Pat. 6408959 USA, IPC E 21 B 10/56 E 21 B 10/573. Polycrystalline diamond compact cutter having a stress mitigating hoop at the periphery / K. E. Bertagnolli, K. M. Jensen. – Publ. 25.06.2002.
72. Bex P. A., Shafto G. R. The influence of temperature and heating time on PDC performance // Ind. Diamond Rev. – 1984. – **44**. – P. 128–132.
73. Tomlinson P. N. Clark I. E. Syndax3 pins – new concepts in PCD drilling // Ibid. – 1992. – **52**, N 3. – P. 109–114.
74. Osipov A. S., Bondarenko N. A., Petruscha I. A., Mechnik V. A. Drill bits with thermostable PCD insert // Diamond Tool. J. – 2010. – N 3. – P. 31–34.

75. *Vohra Y. K., Catledge A. S., Ladi R., Rai G.* Micro-Raman stress investigation and X-ray diffraction analysis of polycrystalline diamond (PCD) tools // *Diamond Relat. Mater.* – 1996. – N 5. – P. 1159–1165.
76. *Lin T. L., Hood M., Cooper G. A., Smith R. H.* Residual stress in polycrystalline diamond compacts // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1994. – 77. – P. 1562–1568.
77. Шульженко А. А., Бочечка А. А., Гаргин В. Г. Получение, структура и свойства поликристаллических и композиционных материалов на основе алмаза // *Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля.* – Т. 1. Синтез алмазов и подобных материалов / Под ред. А. А. Шульженко. – Киев, 2003. – Гл. 10. – С. 259–297.
78. *Wentorf R. H., De Vries R. C., Bundy F. P.* Sintered superhard materials // *Science.* – 1980. – 208, N 4446. – P. 872–880.
79. *Lammer A.* Mechanical properties of polycrystalline diamond // *Mater. Sci. Technol.* – 1988. – 4. – P. 948–956.
80. *Бондаренко Н. А., Мечник В. А.* Бурение нефтегазовых скважин алмазным инструментом ИСМ // *SOCAR Proceedings.* – 2012. – № 3. – С. 6–12.
81. *Pat. 0185189 A1 USA, IPC E21 B10/42, E21 B10/46.* Manufacture of thermally stable cutting elements / A. Griffo, M. K. Keshavan. – Publ. 07.08.08.
82. *Pat. 7635035 USA, IPC B32 B9/00.* Polycrystalline diamond compact (PCD) cutting element having multiple catalytic elements / K. E. Bertagnolli, M. A. Vail. – Publ. 22.12.09.
83. *Pat. 7350601 USA, IPC E21 B10/46.* Cutting elements formed from ultra hard materials having an enhanced condition / J. D. Belnap, S. N. Middlemiss. – Publ. 01.04.08.
84. *Fan P., Fang Z. Z., Guo J.* A review of liquid phase migration and methods for fabrication of functionally graded cemented tungsten carbide // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* – 2013. – 36. – P. 2–9.

Поступила 07.05.18