

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗНОСА БУРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Н. А. ПЕЛИПЕНКО, проф., д-р техн. наук, pelipenkona@mail.ru

Р. Р. БАКЛАНОВ, аспирант

И. С. ПРОЦУК, аспирант

Институт наук о Земле Белгородского государственного национального исследовательского университета, Белгород, Россия

Введение

Практика бурения инженерных скважин показала, что не всегда оправданно применение дорогих инструментов, оснащенных твердосплавными пластинами. Предполагается, что в практику бурения будут введены специальные сервоустройства, позволяющие оперативно восстанавливать геометрию инструмента, в том числе посредством реализации аддитивных технологий [1].

Целью работы является раскрытие характера износа буровых инструментов. Растровый ионно-электронный микроскоп Quanta 200 3D позволил в значительной мере выявить закономерности износа как сверл, так и основного материала инструмента. Методика исследований была построена на основе стандартных решений с учетом конкретных условий эксплуатации бурового инструмента. В лабораторных и полевых условиях были выполнены натурные испытания на износостойкость серии инструментов, состоящей из восьми коронок диаметром 43 мм и стандартных покупных сверл диаметром 12 мм. При проведении испытаний были использованы образцы прочностью III–VIII категорий по шкале проф. М. М. Протодьяконова как наиболее часто встречаемые при бурении инженерных скважин в процессе строительства магистрального газопровода «Сила Сибири» в Тындинском районе Амурской области. При изучении изношенных коронок и сверл обнаружено, что абразивный износ основного металла соотносится примерно 1:2. Поэтому возникло предложение чаще использовать перезатачиваемые цельнометаллические коронки из инструментальной стали с последующей периодической коррекцией геометрии инструмента. Учитывая, что инженерные скважины, как правило, имеют небольшую глубину, частота замены инструментов положительно скажется на производительности труда и стоимости работ. Было решено провести исследование характера износа с использованием ионно-электронного микроскопа.

Методика и результаты исследований

Растровый ионно-электронный микроскоп Quanta 200 3D с электронно-лучевой колонной оснащен вольфрамовым катодом. В состав прибора включено программное обеспечение для автоматизированной подготовки проб к анализу на просвечивающем микроскопе из выбранного участка образца (система ионного фокусированного пучка Magnum, микроманипулятор OmniProbe 100.7). Данный микроскоп позволяет выполнять измерение размера объектов на изображении, выведенном на экран монитора.

Геометрические параметры корпуса сверл выполнены по ГОСТ 885–77 «Сверла спиральные. Диаметры». Корпус изготовлен из инструментальной стали 5ХНМ по ГОСТ 5950–2000 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие

Выполнено интегральное исследование износа буровых инструментов. Проанализирован характер износа в зависимости от конструктивного исполнения рабочей поверхности буровых инструментов. Установлено влияние смазывающей охлаждающей жидкости (СОЖ), содержащей поверхностно-активное вещество (ПАВ), на осевую нагрузку и производительность процесса бурения. Выявлен факт корреляции износа и текущей эксплуатационной шероховатости рабочих поверхностей. Предложена и обоснована аддитивная технология подачи СОЖ, позволяющая существенно повысить конкурентоспособность инструментов, изготовленных в цельнометаллическом исполнении, путем создания специальных каналов в корпусе сверл при помощи 3D-печати, обеспечивающих подведение ПАВ в зону контакта инструмента с породой.

Ключевые слова: износ, интегральный анализ, аддитивная технология, шероховатость, буровой инструмент, заточное приспособление, микроскопные исследования, производительность, повышение, горное дело.

DOI: 10.17580/gzh.2020.12.13

технические условия». Все наружные поверхности выполнены с шероховатостью Ra5 согласно ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики».

Процесс резания исследовали по методике, составленной с учетом информации [2–7], а также с использованием стандартных конструкторско-технологических решений. Одним из факторов надежности инструментов является показатель износа твердосплавных пластин и штырей, выполненных из твердого сплава однокрибидных соединений вольфрама и кобальта, а также на основе Ni-Fe-сплавов инструментальной стали [8–10]. При исследовании износа преимущественно использовали микрометрический анализ. Максимальный износ отдельных твердосплавных пластинок достигал 3,5 мм, что подтверждается результатами исследований других авторов [11–14].

В процессе работы сверла и коронки в забое полностью погружаются в породу, а все поверхности инструмента, кроме присоединительных, подвергаются износу. Интенсивность износа режущей части инструмента является наиболее значимой. Одновременно исследовали износ поверхностей, примыкающих к режущей части инструмента, что позволило проследить характер износа всех поверхностей. Данные наблюдения привели к выводу, что применение дорогостоящих твердосплавных инструментов не всегда оправданно с экономической точки зрения, поскольку инженерные скважины обычно имеют глубину 4–15 м и только в отдельных случаях глубина достигает 25–30 м; выполняют их, как правило, за одну ходку.

В процессе практических наблюдений выявлен характер износа инструментов в зависимости от грунта. Для пород III–VIII категорий крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова целесообразно включать в возимый комплект перезатачиваемые инструменты цельнометаллического исполнения из инструментальной стали в пропорции шесть стальных на один твердосплавный. Инструменты, оснащенные твердым сплавом, в 3,5–4 раза дороже стальных. Практическими и лабораторными исследованиями определено, что свежезаточенные инструменты обладают

производительностью в 1,5–2 раза выше, чем затупившиеся, при этом существенно снижается нагрузка на буровой станок. Существенное снижение износа достигается при ударно-вращательном бурении.

В практике проведения буровых работ, к сожалению, не применяют заточные приспособления. Результаты данного исследования будут использованы для создания мобильного эффективного заточного приспособления с длительностью времени заточки не более 4–5 мин. Авторы надеются, что это предложение станет началом внедрения аддитивной технологии в горном деле.

В процессе резания твердосплавные пластинки нагреваются до температуры 200–300 °С. При такой температуре стойкость пластинки несколько снижается, т. е. можно говорить об их теплостойкости при постоянной нагрузке. Нагреву подвергается и корпус коронки, критическая температура нагрева которого не должна превышать 300 °С. При температурах, превышающих 300 °С, материал коронки теряет сопротивляемость контактным нагрузкам с одновременным возникновением ползучести металла. При нагреве коронки подтвердилась двойственная природа трения.

На буровой снаряд воздействуют внешние силы трения и реакция силы резания, т. е. процесс трения носит диссипативный характер. Для вычисления коэффициента трения можно использовать формулу, предложенную И. В. Крагельским:

$$f = \frac{\tau_0}{P_r} + \beta + \alpha_r K \sqrt{\frac{h}{R}} \quad (1)$$

где τ_0 и β – параметры, характеризующие сдвиговые сопротивления молекулярной связи; P_r – фактическое давление снаряда на забой и стенки скважины; α_r – коэффициент гистерезисных потерь; K – коэффициент формы неровностей и их распределения по высоте (чаще всего 0,4); h/R – относительное внедрение единичной неровности.

Параметры h и R в процессе резания значительно изменяются. В связи с этим возрастает крутящий момент. На практике можно считать, что коэффициент трения изменяется в значительных пределах (0,3–0,4) и более. Термины, связанные с трением, приводятся в ГОСТ 27674–88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения».

Взаимодействие твердосплавных штырей с дном забоя представляет собой процесс многостадийного усталостного разрушения – резание плюс трение. Субмикротрещины развиваются до микротрещин, а затем устанавливается процесс опережающего образования макротрещины. Время смятия микротрещин составляет доли секунды. Поэтому в этот промежуток времени необходимо ввести в трещину ПАВ, препятствующее ее смыканию.

Под действием переменных нагрузок, превышающих прочность породы, происходит их разрушение с образованием шлама, который при повторной нагрузке превращается в слой, демпфирующий ударно-вращательное воздействие на породу. Совмещаются два процесса: хрупкого разрушения породы и медленного усталостного разрушения (изнашивания) инструмента.

Установившееся изнашивание представляет собой медленный стационарный процесс, в ряде случаев характеризуемый выламыванием отдельных кристаллов на поверхности инструмента с образованием микролунки. Стационарный процесс изнашивания можно моделировать на машине трения МИ-1М или других более современных агрегатах. Следует отметить, что интенсивность разрушения породы существенно зависит от установившегося процесса

образования опережающей трещины с использованием ПАВ, препятствующих ее смыканию.

Поскольку процесс усталостного разрушения поверхности инструмента растянут во времени, то численно его можно охарактеризовать числом циклов, после которых наступает износ, характеризуемый другой формулой И. В. Крагельского:

$$n = \left(\frac{\sigma_b f P_r}{k_1} \right)^\gamma \quad (2)$$

где σ_b – предел прочности при разрыве; k_1 – множитель приведения; f – коэффициент трения; P_r – фактическая нагрузка на контакт; γ – показатель степени кривой усталости материала.

Экспериментально формула (2) проверяется через критическое число циклов n , при этом параметр γ определяется путем преобразования в логарифмическое выражение.

Ударно-вращательное разрушение породы представляет собой ударно-волновое погружение инденторов в поверхность забоя. Движение отдельно взятого твердосплавного штыря можно представить как дискретный процесс преодоления упругих сил и сопротивления разрушению с деформацией в точке контакта породы и инструмента. Удельная нагрузка, или мгновенное давление на поверхность забоя, в этом случае равна пределу отношения нормальной составляющей нагрузки к номинальной площади контакта, на которую она действует, и вычисляется по формуле

$$P_a = \lim_{A_a \rightarrow 0} \frac{P}{A} = \left(\frac{dP}{dA_a} \right)_n \quad (3)$$

При равномерном распределении сил: $P_a = P/A$, где P – нормальная составляющая нагрузки; A – номинальная площадь трения; A_a – мгновенная номинальная площадь трения; n – частота ударов.

В приведенном выше примере не учитывают такие факторы, как термическое влияние и совокупность электрохимических явлений при износе, в частности электропластический эффект и эффект Ребиндера.

Заметное влияние на надежность инструментов, длительно работающих под нагрузкой, оказывает износ в виде фреттинг-процесса. Последний представляет собой поверхностное разрушение инструмента в виде микроразрушения рабочей поверхности при длительной нагрузке на буровой снаряд. При определенных условиях бурения может иметь место фреттинг-коррозия, связанная с химическим составом породы. В отдельных случаях интенсивность фреттинг-коррозии превышает нормальный износ в несколько раз. Этот вид износа особенно опасен для коронок, работающих в острореактивной среде.

Для обеспечения ударно-вращательного движения используют известный принцип золотниковых клапан-пульсаторов (рис. 1).

В результате непосредственных замеров с использованием линейного измерителя, а также электронной микроскопии был уточнен характер износа всех поверхностей инструмента. Как и ожидалось, самая высокая интенсивность износа наблюдалась по углам заострения инструментов, а затем – по передним и задним граням. Износ других поверхностей существенно зависит от их конструктивного расположения. Более всего подвержены износу поверхности, которые прилегают непосредственно к местам крепления твердосплавных пластинок. Износ боковой поверхности, контактирующей со стенкой скважины в скользящем режиме, имел минимальный износ, что хорошо коррелируется с формулой (1). Посредством электронной микроскопии выявлено малоизученное явление

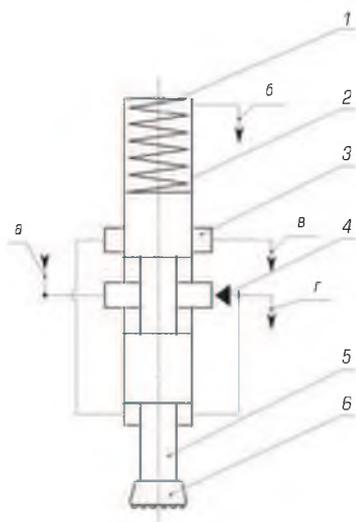


Рис. 1. Устройство золотникового клапана-пульсатора:

1 – пружина; 2 – гильза; 3 – канавка; 4 – клапан; 5 – золотник; 6 – буровой инструмент; а – подача воздуха от компрессора; б, в, г – подача воздуха в зону резания

меняющейся эксплуатационной шероховатости рабочей поверхности инструмента. В этом случае на практике о величине износа можно судить по высоте микронеровностей на исследуемых поверхностях. По размеру шероховатости можно предсказать дальнейшую интенсивность износа. Существенное снижение (в 2,5–3 раза) интенсивности износа наблюдалось при ударно-вращательном бурении.

Своеобразие исследования износа инструментов при виброударном нагружении заключается в том, что разрушение породы происходит в основном за счет приложенной энергии, а не за счет истирания породы инструментом, при этом, естественно,

инструмент также подвергается аналогичному истирающему износу. Микроскопному анализу были подвергнуты три образца инструментов, выполненные из стали 65С2ВА согласно ГОСТ 14959–2016 «Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали»; стали 5ХНМ по ГОСТ 5950–2000 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали» и твердого сплава ВК-8 согласно ГОСТ 4411–79 «Изделия твердосплавные для горного инструмента» и ГОСТ 3882–74 «Сплавы твердые спеченные. Марки». В результате исследования оказалось, что в отдельных случаях целесообразно применять инструменты, выполненные из обыкновенной пружинной стали 65С2В, закаленной до твердости HRC 47-53.

На рис. 2 представлена фотография поверхности твердосплавного элемента, наблюдаются следы обработки и сколы. На рис. 3 показан участок стальной матрицы, на котором прослеживаются процессы истирания, следы скольжения, а в левой части фотографии наблюдается процесс шаржирования. На рис. 4 отчетливо видны крупные зерна карбида вольфрама. Промежуточные размеры между минимальными и максимальными размерами зерен встречаются редко. Крупные зерна в процессе притирки быстро разрушаются на фракции, близкие к минимальным размерам. Четко прослеживаются границы и поверхностный рельеф зерен.

На рис. 5 показана зона контакта исследуемого образца. Как и на рис. 3, здесь видны следы скольжения, образуемые в процессе работы инструмента. На рис. 6 отчетливо видны зерна карбида вольфрама с их неравномерным распределением.



Рис. 2. Поверхность исследуемого инструмента № 1, ×200

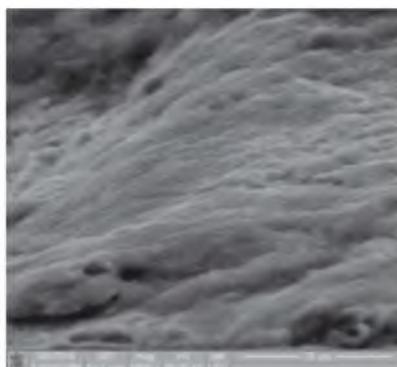


Рис. 3. Процессы истирания и шаржирования, ×5000

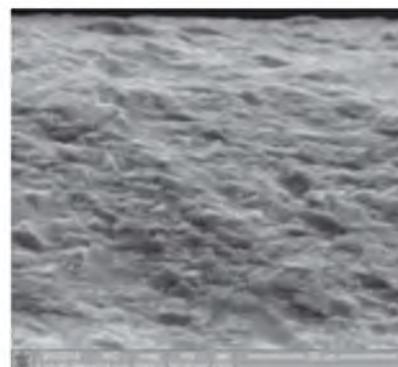


Рис. 4. Зерна карбида вольфрама, ×5000 (инструмент № 1)



Рис. 5. Поверхность исследуемого инструмента № 2, ×200

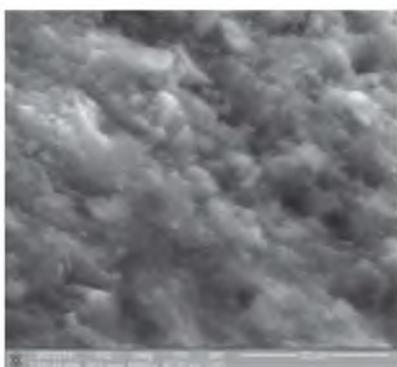


Рис. 6. Зерна карбида вольфрама, ×5000 (инструмент № 2)

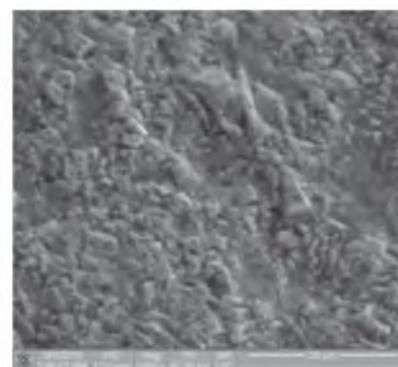


Рис. 7. Неравномерное распределение зерен, ×5000

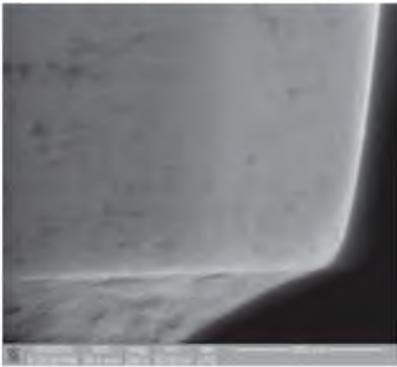


Рис. 8. Режущая кромка инструмента № 3, ×200



Рис. 9. Усталостные разрушения и явление питтинга, ×200

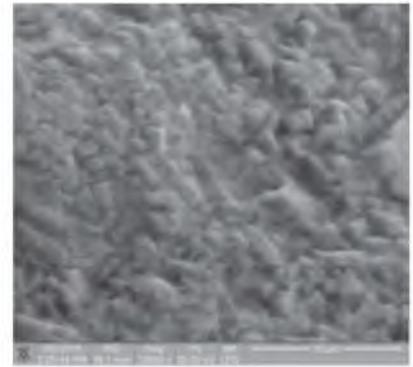


Рис. 10. Зерна различной крупности, ×10000 (инструмент № 3)

Небольшие углубления и скопления зерен, хорошо прослеживаемые на рис. 7, являются результатом износа инструмента № 2.

На рис. 8 отображена режущая кромка инструмента № 3. На рис. 9 показаны усталостные разрушения режущей кромки и явление питтинга, представляющее собой образование коррозионных ям под воздействием кислорода. На рис. 10 изображен снимок зерен, которые имеют различную крупность, и, как на рис. 7, выражено явление износа инструмента.

Выводы

1. Основной причиной снижения осевой нагрузки при использовании СОЖ, содержащей ПАВ, вероятно, является эффект замедления смыкания микротрещин, последовательно возникающих при ударном контакте инструмента с породой при попадании ПАВ в микротрещину.

2. Открываются возможности существенного повышения производительности бурения при условии создания эффективной аддитивной технологии, совмещенной с подачей ПАВ непосредственно в контакт инструмента с породой.

3. Для снижения стоимости инструмента предлагается использовать вместо твердого сплава инструментальные стали: 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С, 5ХВ2С, 6ХВ2С, 6ХВГ согласно ГОСТ 5950–2000 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия», 14ХГС, 15ХСНД согласно ГОСТ 19281–89 «Прокат из стали повышенной прочности». Имеется возможность

использования более дешевых углеродистых сталей У7А, У8А (ГОСТ 5950–2000) и др. Применение инструментов, изготовленных из перечисленных сталей, позволяет повысить ресурс машинного времени инструмента в несколько раз за счет многократных восстановительных заточек, число которых может достигать 20 и более.

4. Можно предположить, что износ инструментов, выполненных из инструментальной стали, будет несколько выше по сравнению с использованием твердого сплава.

5. Существует возможность повышения долговечности инструментов, изготовленных из инструментальной стали, путем не только многократной переточки, но и внедрения технологии подачи в забой ПАВ.

6. Конструкция сверл и коронок должна предусматривать возможность непосредственной подачи ПАВ, а также многократное восстановление переточкой.

7. Приспособление для переточки должно обеспечивать восстановление геометрии инструмента в течение оперативного времени.

8. Аддитивные технологии, основанные на применении переносных заточных устройств и ПАВ, могут стать ключевым шагом к совершенствованию процесса бурения благодаря увеличению производительности, срока службы инструментов и экономической выгоды.

Библиографический список

См. англ. блок. **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 12, pp. 60–64
DOI: 10.17580/gzh.2020.12.13

Integrated analysis of drilling tool wear

Information about authors

N. A. Pelipenko¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences, pelipenkona@mail.ru

R. R. Baklanov¹, Post-Graduate Student

I. S. Protsuk¹, Post-Graduate Student

¹Institute of Earth Sciences, Belgorod State University, Belgorod

Abstract

The integrated analysis of wear of drilling tools is performed. The wear pattern is analyzed versus the build of the acting faces of drilling tools. It is found that a cooling lubricant containing a surface active substance (SAS) has influence on the axial load of the tool and on the drilling capacity. The correlation between wear and current roughness of acting faces of tools is revealed. The additive technology developed and validated for feeding cooling lubricants enables higher competitive capability of all-metal tool owing special grooves made in the drill body by 3D printing to ensure SAS inlet to the rock–drilling tool contact. The comparative study of wear of tools under vibro–percussive loading with regard

to the loading condition is carried out. We studied three tools made of steel grades 65S2VA, 5KHNM and of hard alloy VK-8. An attempt is made to utilize hidden capacities of spring steel in manufacture of tool capable to operate under superposition of vibrations. For such rocks as sandstone, limestone, shale, iron ore, clay, etc., having strength categories from IV to X on the Protodyakonov scale, it is possible to use tools made of spring or structural steel, which enables considerable reduction in the cost of drilling. Structural steels used to manufacture drilling tools for hard rock drilling under superposition of vibrations sometimes can efficiently replace expensive tools made of hard alloys. Another beneficial factor is high brittle fracture resistance of instrument steels as against hard-alloy tools. The study reveals the dependence of tool durability on the tool geometry. Preliminary observations show that geometry is an essential factor for tools made of structural and instrumental steels. It is suggested that wear of instrumental steel tool insignificantly differs from hard-alloy wear. In some cases, well-hardened instrumental steel successively competes with hard alloy.

Keywords: wear, integrated analysis, additive technology, roughness, drilling tool, sharpening fixture, microexamination, capacity, improvement, mining.

References

1. Beshenkov P. S., Polushin N. I., Gkhorbani S., Sorokin E. N. Stress distribution analysis of PDC drill bits by computer modeling. *Eurasian Mining*. 2017. No. 2. pp. 25–28. DOI: 10.17580/em.2017.02.06