

21. Vasilyev A. M., Kuskov V. B. Specific features of the concentration process for fine-grained materials in a short-cone hydrocyclone. *Obogashchenie Rud.* 2018. № 2. С. 30–34. DOI: 10.17580/or.2018.02.06
22. Chekmasov N. V., Shishlyannikov D. I. Method of rock massifs disintegration by rowwise cuts. Patent RF, No. 2522111. Applied: 26.03.2013. Published: 10.07.2014, Bulletin No. 19.
23. Savchenkov S. A., Bazhin V. Yu., Vilenskaya A. V. Training of specialists in the field of intellectual property protection and invention at universities for mining engineering. *Eurasian Mining.* 2018. No. 1. pp. 45–47. DOI: 10.17580/em.2018.01.10
24. Starkov L. I., Shishlyannikov D. I., Maksimov A. B. et al. Self-aligning cutter with fastening device on machine executive body. Patent RF, No. 2672071. Applied: 09.01.2018. Published: 09.11.2018, Bulletin No. 31.
25. Sukhanov A. E., Maksimov A. B. Justification of parameters for loading equipment of heading-and-winning machines Ural-20R. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh.* 2018. No. 1. pp. 433–436.
26. Han M. D., Cai Z. X., Qu C. Y., Jin L. S. Dynamic numerical simulation of cutterhead loads in TBM tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology.* 2017. Vol. 70. pp. 286–298.

УДК 622.24-192

НАДЕЖНОСТЬ ГОРНЫХ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ

Н. А. ПЕЛИПЕНКО¹, проф., д-р техн. наук, pelipenkona@mail.ru

Р. Р. БАКЛАНОВ¹, аспирант

И. С. ПРОЦУК², ведущий специалист отдела контроля качества полевых инженерных изысканий

Н. Г. КАРПЕНКО¹, аспирант

¹ Институт наук о Земле Белгородского государственного национального исследовательского университета, Белгород, Россия

² ООО «ИГИИС», Москва, Россия

Введение

Надежность как наука об оценке качественных показателей изделий, машин, комплексов и производственных процессов получила свое развитие в 1960-е годы. Первой научной работой была книга американского ученого русского происхождения Игоря Базовского «Надежность: теория и практика» (1965 г.), в которой обобщены достижения в новой науке. В настоящее время наука о надежности получила широкое развитие и применяется во всех отраслях человеческой деятельности.

Вопросам повышения прочности и износостойкости буровых коронок посвящено множество трудов. Авторским коллективом было выполнено исследование [1] износа буровых инструментов, в ходе которого проанализирован характер износа в зависимости от конструктивного исполнения инструмента. В работах [2–5] предлагаются различные варианты модернизации бурового снаряда путем внесения изменений в конструкцию, повышающих их эксплуатационный срок. В исследовании [6] авторы рассматривают процесс бурения как совокупность процессов резания и истирания. В статье [7] показано влияние высокотемпературной термомеханической обработки на механические свойства стали ХН4М, при этом отмечается положительный эффект от упрочнения. Анализ и расчет параметров бурения с продувкой с использованием авторской методики приводятся в статье [8]. Из последних публикаций следует отметить работу [9], в которой авторы убедительно доказывают, что повышение надежности и долговечности горного оборудования являются важнейшими показателями, влияющими на объемы добычи полезных ископаемых. Авторский коллектив работы [10] предложил и внедрил

Предпринята попытка применения метода достоверной оценки износа и надежности буровых инструментов и приведены результаты сравнительных исследований износа. Рассмотрен износ твердосплавных штырей по сравнению с материалом корпуса. Изложены причины преждевременного разрушения коронок в результате ошибок изготовления и сборки. Рассмотрен характер износа при различных видах бурения. Приведены расчетные формулы по оценке надежности и рекомендации по конструированию и эксплуатации буровых коронок, выполненных из инструментальной стали и оснащенных твердосплавными режущими элементами.

Ключевые слова: твердосплавные штыри, разрушение буровых коронок, разрушение и нормальный износ режущих элементов, конструирование и эксплуатация, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, приработочный период, железистые кварциты
DOI: 10.17580/gzh.2021.12.09

технологии гуммирования отдельных деталей, подвергаемых интенсивному износу, а также обосновал на конкретном примере ее эффективность. Отрицательное влияние на надежность работы горных машин вибраций, в частности процесса фреттинга, доказано в работе [11], там же обоснованы основные закономерности возникновения фреттинга. Авторами работы [12] предложен комплекс технологий, направленных на повышение износостойкости броней, а также метод предохранения дробилки от воздействия негабаритов в процессе эксплуатации.

Исследования зарубежных авторов [13–17] направлены на изучение износа буровых инструментов с использованием современных технологий упрочнения металла и применением качественных материалов. В работах [18–21] рассмотрены характеристики буровых инструментов на основе карбида вольфрама WC-Co (содержание WC – 92 %, Co – 8 %), указаны особенности износа и срок службы инструментов.

Целью данной работы является раскрытие характера износа твердосплавных буровых коронок и долот. Использован метод реплик для непосредственного измерения износа режущих элементов. На российском рынке получили распространение буровые коронки как отечественных, так и иностранных производителей: завод бурового инструмента «Геобурмаш», Atlas Copco, Sandvik, Mitsubishi Materials, Boart Longyear, Ingersoll-Rand и др.

Термины, используемые в этой статье, соответствуют ГОСТ Р 27.002–2009 «Надежность в технике. Термины и определения». Для сравнения буровых коронок с резаками для ударно-вращательного бурения использован ГОСТ Р 58201–2018 «Резцы буровые для пневматических и гидравлических анкероустановщиков», включая нормативные документы, входящие в данный стандарт. Все наружные поверхности бурового инструмента обработаны согласно ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики». Соединительная часть выполнена в форме конусной веревочной резьбы, изготовленной согласно международному стандарту ISO 10208:1991 Rock drilling equipment – Left-hand rope threads и государственному немецкому стандарту DIN 20317–2014 Rock drilling – Round thread connections for percussive drilling equipment – Dimensions, design.

Анализ и оценка надежности бурового комплекса

Случайными событиями при бурении скважин являются: выпадение штырей и их поломка; разрушение корпуса бурового инструмента из-за скрытых дефектов; проворачивание инструмента по веревочной резьбе; выкрашивание режущих элементов в результате случайных ударов; разрушение инструмента под действием избыточной осевой силы; заклинивание инструмента; отказ привода вращателя и подъема бурового снаряда; обрыв крепежных деталей и некоторые другие. Приработочный период при бурении скважин новыми инструментами должен осуществляться в щадящем режиме. Длительность приработочного периода составляет 25–50 ч, в течение которого штыри окончательно занимают свое место в гнездах корпуса бурового инструмента.

Нормальный износ инструмента носит неравномерный характер, связанный с прослойками различной крепости и реологией буримой породы. Таким образом, надежность бурового комплекса, включающего станок, буровой снаряд и инструмент, зависит от случайных факторов и постепенного износа. Совместное действие этих факторов необходимо учитывать при оценке надежности бурового комплекса.

Любому производству дискретных изделий или всяким дискретным технологическим операциям присуща регулярная погрешность в изготовлении. В данном случае это касается диаметра отверстия в корпусе и диаметра штырей.

Целесообразной относительно материальных расходов, затрат технологического времени и живого труда является система «отверстия», которая подразумевает постоянство размаха варьирования допуска при изготовлении отверстий в диапазоне $0 - \alpha$, где α зависит от выбора качества точности сопряжения деталей (в инструментальном производстве составляет 5–15 мкм).

Система «вала» в любом производстве часто является более затратной по сравнению с системой «отверстия» и используется как резервная. В данном случае сечения отобранных твердосплавных штырей, имеющих наружный диаметр, превышающий требования, подвергают корректирующей обработке на бесцентрово-шлифовальном станке. Благодаря такой обработке обеспечивается оптимальный натяг в сопряжении

отверстие–штырь. Повышение рабочей температуры инструмента в забое выше допустимой (более 250–300 °С) приводит к ослаблению неподвижного сопряжения отверстие–штырь, т. е. уменьшению упругого натяга и даже появлению микрозазора в сопряжении.

Изменения макроусловий бурения – наличие крепких прослоек и включений, повышенная абразивность и трещиноватость – носят вероятностный характер.

Многочисленные перегрузки инструмента приводят к появлению остаточных деформаций сопряжения отверстие–штырь. В реальных условиях приведенные соображения, касающиеся изготовления инструмента и его эксплуатации, могут сочетаться произвольным случайным образом и описываются формулами (1) и (2), которые носят экспоненциальный характер:

$$P(\Delta t) = e^{-\Sigma\lambda_i\Delta t}; \quad (1)$$

$$Q(\Delta t) = 1 - e^{-\Sigma\lambda_i\Delta t}; \quad (2)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы в течение обычно 1–100 или 1000 ч; $Q(t)$ – вероятность отказа инструмента за промежуток времени Δt ; $\Sigma\lambda_i$ – сумма случайных сочетаний наследственных и эксплуатационных факторов, численно выраженных в виде интенсивности внезапных отказов, ч⁻¹, который характеризует оценку математического ожидания. Оценки $P(t)$ и $Q(t)$ являются обобщенными характеристиками качества изделий.

Формулы (1) и (2) описывают вероятностный процесс надежности инструмента или отдельной детали машины. Для их использования на практике требуется накопление статистических данных и фактов случайных выходов из строя. Достоверность оценки зависит от величины выборки N , т. е. числа поломок инструмента или деталей. При $N = 20 \div 100$ случаев достоверность оценки будет находиться в пределах 0,95–0,99. Такая оценка вполне удовлетворяет требованиям бурения скважин.

Другим важным показателем надежности инструментов является нормальный износ. В отличие от внезапных отказов, описываемых экспоненциальным распределением, износотверженные отказы описывают нормальным законом или распределением Вейбулла. В этом случае события отказа носят постепенный нарастающий характер, растянутый во времени. Наиболее значимыми параметрами, влияющими на величину износа, являются крепость и абразивность породы.

Для практической оценки показателей надежности, связанной с износом, можно воспользоваться следующим примером: определить вероятность безотказной работы горного комплекса за длительный период времени, равный $t_1 = 700$ ч и $t_2 = 1300$ ч, при условии, что отказы износотверженные, а закон распределения времени работы нормальный со средним временем $t = 1000$ ч и средним квадратическим отклонением $\sigma = 316$ ч. Нас интересует вероятность отказа комплекса в первом случае, когда наработка меньше средней ($700 < 1000$) и во втором случае, когда она больше средней ($1300 > 1000$).

Используя формулу (3) по таблице (для интеграла Лапласа) находим:

$$P(t) = 0,5 - \Phi((t_1 - \bar{t})/\sigma); \quad (3)$$

где Φ – табулированная функция Лапласа.

$$P(1300) = 0,17106.$$

Вычисления показали, что после достижения средней наработки на отказ надежность быстро снижается.

По условию предыдущего примера попробуем определить вероятность безотказной работы горного комплекса в интервале времени $t_1 = 700$ ч, $t_2 = 900$ ч; воспользовавшись формулой [Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. – М.: Наука, 1965. – 56 с.]:

$$P(t_1; t_2) = \frac{0,5 - \Phi((t_2 - \bar{t})/\sigma)}{0,5 - \Phi((t_1 - \bar{t})/\sigma)}, \quad (4)$$

получим $P(700; 900) = 0,7554$.

Вероятность отказа в интервале времени от $t_1 = 700$ ч до $t_2 = 900$ ч составит $Q(700; 900) = 0,2446$. Формула (4) используется для оценки условной вероятности надежности изделий, имеющих предварительную наработку, в данном случае t_1 и t_2 ; при этом \bar{t} является оценкой математического ожидания по времени.

Надежность системы предохранительных устройств привода бурового станка, ограничивающих крутящий момент бурового снаряда, необходимо рассматривать как вероятность безотказной работы каждого из устройств, например $P_i(100) = 0,8$. Принятая априори вероятность безотказной работы $P_i(100) = 0,8$ является недостаточной для требований практики. В этом случае необходимо воспользоваться конструктивным решением по созданию надежной системы из ненадежных элементов – резервированием. Вероятность безотказной работы устройств при тройном резервировании $P(100) = 0,992$.

Этот пример показывает, как конструктивными методами можно обеспечить высокую надежность отдельных узлов горной машины, используя ненадежные элементы. Немаловажным фактором в работе буровых бригад является формирование запасов необходимых буровых инструментов.

Рассмотрим еще один пример. Необходимо определить вероятность успешного бурения скважины с вероятностью $P_{тр} = 0,98$. Из предыдущего примера известно, что буровые коронки обладают вероятностью безотказной работы в течение $P_{\phi}(100) = 0,55$, т. е. одной коронки для выполнения полученного задания недостаточно. Необходимо определить число однотипных инструментов в резерве, чтобы задание по бурению скважины было выполнено с упомянутой выше вероятностью.

Вероятность отказа отдельно взятой коронки:

$$Q(100) = 1 - 0,55 = 0,45. \quad (5)$$

Необходимое условие:

$$P_{тр}(100) \geq P_{рез}(100), \quad (6)$$

где $P_{рез}$ – вероятность безотказной работы отдельно взятой коронки.

Для упрощения расчетов воспользуемся формулой (7) через смежные события $Q(100)$, которые оценивают вероятность отказов. Так как $Q(100) + P(100) = 1$, то

$$Q(100) = (1 - P(100)). \quad (7)$$

Воспользовавшись итерационным вычислением, находим $n = 5$, где n – степень резервирования. Подставив числа в формулу (7), получим: $Q(100) = (1 - 0,55)^5 = 0,0185$. В результате:

$$P_{рез}(100) = 1 - Q_{см}(100) = 1 - 0,0185 = 0,9815, \text{ где } Q_{см} - \text{вероятность отказа дублированной системы.}$$

Таким образом, условие, согласно формуле (6), выполняется: $0,98 < 0,9815$. Для обеспечения выполнения задания с вероятностью $P_{тр} = 0,98$ необходимы 5 коронок одного определенного типа.

Исходя из вышеизложенного, рассмотрим вопросы надежности буровых инструментов на практике. При оценке износа трехшарошечных долот изучена кинематика вращения шарошки в забое. Частота вращения шарошки в основном определяется штырями, расположенными на максимальном диаметре шарошки. Другие штыри разрушают породу преимущественно за счет истирания. Вращение шарошки всегда неравномерное. При неблагоприятном контакте с горной породой головка шарошки прекращает вращение и работает как истирающий инструмент. Явление неравномерного вращения головок шарошек особенно заметно на долотах малого диаметра. При этом наблюдались прерывистое вращение и полная остановка вращения – заклинивание. Такой характер разрушения горной породы свойствен коронкам с неподвижно закрепленными штырями. Эта аналогия существенно облегчает изучение износа твердосплавных элементов.

При проведении экспериментов оказалось, что износ штырей носит одинаковый характер, следовательно, при вращательном и ударно-вращательном разрушении породы физическая природа износа штырей не отличается.

В данной работе исследован износ семи типоразмеров штыревых коронок диаметром 30–50 мм, оснащенных штырями из материала ВК-8. Коронки использовали для бурения в элювиальных и железистых кварцитах, в частности железно-слюдковых и мартигитогидрогематитовых, характеризуемых крепостью I–III категорий по шкале М. М. Протодьяконова. В процессе проведения работ неоднократно отмечали неоднородность пород с карбонатизированными прослойками, что означает большое колебание физико-механических свойств, значительно влияющее на износ штырей коронок, надежность инструментов и буровых машин в целом.

На рис. 1 представлен типовой образец буровой коронки с конусным соединением диаметром 38 мм, с полубаллистической формой штырей. Режущая часть коронки образует сферическую лунку на дне забоя, которую можно назвать эффективной поверхностью разрушения породы Δh . Диаметр боковых и торцовых штырей составляет 8 мм. Штатные углы положения внешних штырей ϕ по отношению к оси вращения составляют 40° . На рабочей части коронки, где показаны штыри с изношенной головкой, наблюдается характерное усталостное разрушение штыря. Просвет продувочных окон деформирован.

На рис. 2, а показана рабочая поверхность коронки с отсутствующими штырями. Основной причиной является нарушение температурного режима и технологии изготовления отверстий с нарушением глухой посадки, вследствие чего штыри выпали в процессе бурения. На рис. 2, б показан предельный износ штырей в результате длительной эксплуатации. На рис. 2, в изображена деформация стальной матрицы коронки, вызванная



Рис. 1. Общий вид коронки после наработки 50 ч

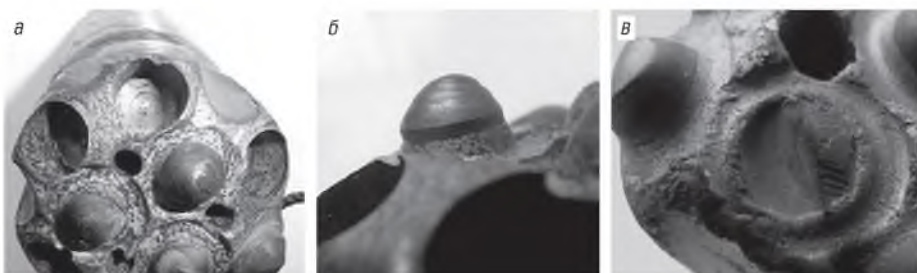


Рис. 2. Характер износа инструментов:

a — выламывание штырей; *б* — неравномерный износ штыря; *в* — усталостное разрушение штыря

поступательно-вращательными движениями бурового инструмента. Заметны следы скольжения и истирания. Место изломанного штыря характеризуется усталостным разрушением. Поверхность выломанного штыря в правой трети испещрена трещинами, а остальная часть деформирована по поверхности скольжения. Продувочное окно приобрело щербатую форму. Полуэллиптическая форма штырей изношена по боковым поверхностям до диаметра скважины. Уменьшение диаметра коронки составляет 0,65 мм.

На рис. 3 изображены осевое смещение штырей при нагрузке и вырывание их высоты над корпусом коронки в приработочный период. Такое явление объясняется нарушением технологии монтажа штырей. Остальные штыри на рис. 3 не показаны, масштаб штырей относительно корпуса условный.

Выводы

1. Исследования показали, что при расчетах надежности буровых снарядов необходимо учитывать случайные события, происходящие в процессе бурения: потери штырей при эксплуатации и их разрушение. Необходимо изменить посадку сопряжения штырь–корпус на глухую посадку с нагревом корпуса до температуры 280–300 °С.

2. Приработочный период износа штырей носит неравномерный характер. Основной причиной неравномерности износа является несоблюдение глухой посадки при изготовлении коронки.

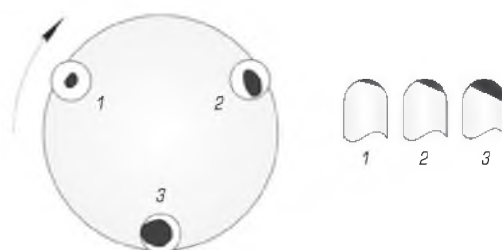


Рис. 3. Неравномерный износ штырей 1, 2, 3 в приработочный период

3. Приработочный период штырей буровых коронок, выполненных из сплава ВК-8, находится в пределах 25–50 ч и зависит от реологического состава породы.

4. Выпадение штырей в процессе эксплуатации происходит по двум причинам: несоответствие глухой посадки и перегрев коронки в процессе эксплуатации с повышенной осевой нагрузкой.

5. Причиной износа деталей станка является виброударное бурение с повышенной осевой нагрузкой.

6. Для повышения надежности коронок и обеспечения более высокой производительности буровых работ необходимо располагать штыри с переменным центральным углом, обеспечивающим неповторяющийся след при разрушении породы.

7. Предложенные расчетные формулы для оценки надежности будут полезны при проектировании буровых станков, снарядов и инструментов.

Библиографический список

1. Пелипенко Н. А., Бакланов Р. Р., Процук И. С. Интегральный анализ износа буровых инструментов // Горный журнал. 2020. № 12. С. 60–64. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.13
2. Третьяк А. А. Технология упрочнения буровых коронок // ГИАБ. 2016. № 10. С. 121–130.
3. Клишин В. И., Косолюпин Д. И., Алексеев С. Е., Кубанычбек Б. Создание бурового оборудования и инструмента для проходки скважин малого диаметра в крепких породах // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 2. № 3. С. 120–126.
4. Григорьев Б. В., Скрябин Р. М. Инновационные пути совершенствования породоразрушающих инструментов для колонкового бурения с продувкой сжатым воздухом в осложненных условиях // Арктика XXI век. Технические науки. 2015. № 1(3). С. 51–59.
5. 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. P. 25–28. DOI: 10.17580/em.2017.02.06
6. Пелипенко Н. А., Процук И. С., Добрынин В. Е., Греховодов И. И. К вопросу о физике бурения скальных пород // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. 2016. № 3. С. 14–17.
7. Смирнов М. А., Пышминцев И. Ю., Лаев К. А., Храмов Е. В., Алютин Д. М. Свойства высокохромистых коррозионноустойчивых сталей, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2015. № 3(51). С. 78–82.
8. Бузанов К. В., Борисов К. И. Обоснование и расчет параметров оборудования и распределения аэродинамических давлений при реализации пневмоударного бурения

ния в геологических условиях Чаяндинского месторождения // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. 2015. № 4. С. 9–14.

9. Шибанов Д. А., Иванов С. Л., Емельянов А. А., Пумпур Е. В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // ГИАБ. 2020. № 10. С. 86–94.
10. Пенкин Н. С., Сербии В. М. Повышение надежности и долговечности горнообогатительного оборудования методом гуммирования // ГИАБ. 2017. № 9. С. 71–78.
11. Бойко П. Ф., Титиевский Е. М., Тимирязев В. А., Мнацаканян В. У. Повышение долговечности и диагностика состояния броней конусных дробилок большой единичной мощности // Горный журнал. 2019. № 4. С. 42–47. DOI: 10.17580/gzh.2019.04.14
12. Вержанский А. П., Набатников Ю. Ф., Островский М. С., Радкевич Я. М. Влияние вибраций на надежность горных машин // Горный журнал. 2018. № 4. С. 66–71. DOI: 10.17580/gzh.2018.04.12
13. Koki Suzuki, Rei Koyasu, Yukihisa Takeda, Hiroyuki Sasahara. Application of a novel woven metal wire tool with electrodeposited diamond grains for carbon fiber reinforced plastics core drilling // Precision Engineering. 2019. Vol. 56. P. 386–394.
14. Niketh S., Samuel G. L. Surface texturing for tribology enhancement and its application on drill tool for the sustainable machining of titanium alloy // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 167. P. 253–270.

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 12, pp. 51–55
DOI: 10.17580/gzh.2021.12.09

Reliability of mining machines and tools

Information about authors

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

R. R. Baklanov¹, Post-Graduate Student

I. S. Protsuk², Leading Specialist at the Field Engineering Survey Quality Control Department

N. G. Karpenko¹, Post-Graduate Student

¹Institute of Earth Sciences, Belgorod State University, Belgorod, Russia

²IGILS LLC, Moscow, Russia

Abstract

An attempt is made to apply the method of reliable assessment of wear and reliability of drilling tools, and the results of comparative studies of wear are presented. The wear of carbide pins is compared with the wear of the body material. During the running-in period of new crowns, uneven wear of the pins was observed, which was further leveled after 30 hours of total machine operating time. The reasons for the premature destruction of crowns as a result of manufacturing and assembly errors are described. The nature of wear in various types of drilling is considered. The reliability calculation formulas and the recommendations for the design and operation of drill bits made of tool steel and equipped with carbide cutting elements are given. Within the study, the wear of seven standard sizes of pin bits with a diameter of 30–50 mm, equipped with pins made of VK-8 material for drilling eluvial and redeposited ferruginous quartzites of various types (iron mica and martite-hydrohematite) was investigated. The ore body composed of the above-listed ores, is characterized by a wide variety of physical and mechanical properties. These properties affect the wear of bit pins and the reliability of tools and machines in general. Ore and gangue can alternate randomly, therefore, in the interbeds of carbonated rocks, tools experience increased wear and high temperature at the tool–rock interface. Productivity of process well drilling depends significantly on the reliability of the drilling machine, assembly and tool. Accidental breakdowns and increased wear of tools, as well as failure of the machine and equipment assemblies as a result of high loads often take place in drilling. Breaking of pins and their falling out under the influence of high temperature is also observed, which weakens the interface between the pin and the crown body. Alongside with random and wear failures, their integrated effect on the performance of technological operations is discussed. The calculation formulas are given.

Keywords: carbide pins, destruction of drill bits, destruction and normal wear of cutting elements, design and operation, reliability, durability, maintainability, running-in period, ferruginous quartzites.

References

1. Pelipenko N. A., Baklanov R. R., Protsuk I. S. Integrated analysis of drilling tool wear. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 12. pp. 60–64. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.13
2. Tretyak A. A. Technology strengthening of drill bits. *GIAB*. 2016. No. 10. pp. 121–130.
3. Klislin V. I., Kokoulin D. I., Alekseev S. E., Kubanychbek B. Engineering of small-diameter drilling equipment and tool for hard rocks. *Interexpo GEO-Sibir*. 2016. Vol. 2, No. 3. pp. 120–126.
4. Grigorev B. V., Skryabin R. M. Innovative ways of improvement of the structures rock-destructive tools for core drilling with air purge in complicated conditions. *Arktika XXI vek. Tekhnicheskie nauki*. 2015. No. 1(3). pp. 51–59.

15. Yahiaoui M., Paris J.-Y., Denape J., Colin C., Ther O. et al. Wear mechanisms of WC-Co drill bit inserts against alumina counterface under dry friction: Part 2 – Graded WC-Co inserts // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2015. Vol. 48. P. 65–73.
16. Surreddi K. B., Yvell K., Norgren S., Olsson M. Characterization of surface degradation and wear damage of cemented carbide in rock drilling // *Proceedings of the 18th Nordic Symposium on Tribology*. – Uppsala, 2018.
17. Jones H. G., Norgren S. M., Kritikos M., Mingard K. P., Gee M. G. Examination of wear damage to rock-mining hardmetal drill bits // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2017. Vol. 66. P. 1–10.
18. Momeni S., Moseley S., Ante M., Allaart J. The wear of WC-Co drill bits during rotary-percussive drilling of reinforced concrete // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2017. Vol. 62. P. 202–209.
19. Toller L., Jacobson S., Norgren S. Life time of cemented carbide inserts with Ni-Fe binder in steel turning // *Wear*. 2017. Vol. 376–377. P. 1822–1829.
20. Singh M., Singh H. Modulation Assisted Drilling of Inconel-718 Ni-based Superalloy // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 18. P. 812–821.
21. Youfi M. A., Weidow J., Nordgren A., Falk L. K. L., Andrén H.-O. Deformation mechanisms in a WC-Co based cemented carbide during creep // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2015. Vol. 49. P. 81–87. **PK**

5. 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
6. Pellpenko N. A., Protsuk I. S., Dobrynin V. E., Grekhovodov I. I. For the question about the physics of the hard rock drilling. *Vestnik assotsiatsii burovyykh podryadchikov*. 2016. No. 3. pp. 14–17.
7. Smirnov M. A., Pyshmintsev I. Yu., Laev K. A., Khrankov E. V., Alyutin D. M. Properties of high-chromium corrosion-resistant steels exposed to high-temperature thermomechanical treatment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*. 2015. No. 3(51). pp. 78–82.
8. Buzanov K. V., Borisov K. I. Verification and calculation of equipment parameters and distribution of aerodynamic pressures for air hammer drilling in Chayandinskoye field. *Vestnik assotsiatsii burovyykh podryadchikov*. 2015. No. 4. pp. 9–14.
9. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Emelyanov A. A., Pumpur E. V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *GIAB*. 2020. No. 10. pp. 86–94.
10. Penkin N. S., Serbli V. M. Enhancement of reliability and durability of mining and processing machines by gumming. *GIAB*. 2017. No. 9. pp. 71–78.
11. Boyko P. F., Titiyevskiy E. M., Timiryazev V. A., Mnatsakanyan V. U. Life improvement and diagnostics of high unit capacity cone crusher lining. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 4. pp. 42–47. DOI: 10.17580/gzh.2019.04.14
12. Verzhansky A. P., Nabatnikov Yu. F., Ostrovsky M. S., Radkevich Ya. M. Effect of vibrations on reliability of mining machines. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 4. pp. 66–71. DOI: 10.17580/gzh.2018.04.12
13. Koki Suzuki, Rei Koyasu, Yukihisa Takeda, Hiroyuki Sasahara. Application of a novel woven metal wire tool with electrodeposited diamond grains for carbon fiber reinforced plastics core drilling. *Precision Engineering*. 2019. Vol. 56. pp. 386–394.
14. Niketh S., Samuel G. L. Surface texturing for tribology enhancement and its application on drill tool for the sustainable machining of titanium alloy. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 167. pp. 253–270.
15. Yahiaoui M., Paris J.-Y., Denape J., Colin C., Ther O. et al. Wear mechanisms of WC-Co drill bit inserts against alumina counterface under dry friction: Part 2 – Graded WC-Co inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2015. Vol. 48. pp. 65–73.
16. Surreddi K. B., Yvell K., Norgren S., Olsson M. Characterization of surface degradation and wear damage of cemented carbide in rock drilling. *Proceedings of the 18th Nordic Symposium on Tribology*. Uppsala, 2018.
17. Jones H. G., Norgren S. M., Kritikos M., Mingard K. P., Gee M. G. Examination of wear damage to rock-mining hardmetal drill bits. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2017. Vol. 66. pp. 1–10.
18. Momeni S., Moseley S., Ante M., Allaart J. The wear of WC-Co drill bits during rotary-percussive drilling of reinforced concrete. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2017. Vol. 62. pp. 202–209.
19. Toller L., Jacobson S., Norgren S. Life time of cemented carbide inserts with Ni-Fe binder in steel turning. *Wear*. 2017. Vol. 376–377. pp. 1822–1829.
20. Singh M., Singh H. Modulation Assisted Drilling of Inconel-718 Ni-based Superalloy. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 18. pp. 812–821.
21. Youfi M. A., Weidow J., Nordgren A., Falk L. K. L., Andrén H.-O. Deformation mechanisms in a WC-Co based cemented carbide during creep. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2015. Vol. 49. pp. 81–87.