

УДК 622.24

# УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ С БУРОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

**Н. А. ПЕЛИПЕНКО**, проф., д-р техн. наук, [pelipenkona@mail.ru](mailto:pelipenkona@mail.ru)  
**Р. Р. БАКЛАНОВ**, аспирант

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

## Введение

Важнейшим направлением совершенствования технологии буровых работ является надежность инструментов. Последняя представляет собой качественный показатель оценки состояния инструмента. Количественными показателями надежности являются безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, т. е. характеристики, предусмотренные ГОСТ Р 27.002–2009 «Надежность в технике. Термины и определения». В свою очередь, безотказность определяется вероятностью выхода из строя инструмента от случайных причин, к которым относятся особо прочные включения в породе, ошибки в изготовлении инструментов, а также нарушение режима эксплуатации. Безотказность определяется вероятностью возникновения отказа в течение определенного времени. Для буровых работ таким показателем является сточасовой режим чистого времени бурения. Долговечность инструмента определяется не только вероятностью случайного отказа, но и нормальным его износом. Время нормального износа инструмента, в свою очередь, зависит от таких показателей, как абразивность, твердость, трещиноватость пород, а также наличия такого явления, как шаржирование. Ремонтпригодность инструмента характеризуется тем, что он имеет возможность подвергаться периодическому восстановлению режущих свойств, например путем замены штырей, шарошек. Однако в подавляющем большинстве случаев штыри и шарошки замене не подлежат, поэтому инструмент списывают. Сохраняемость инструментов оценивают временем хранения инструмента при условии сохранения технологических возможностей, а также продолжительностью сохранения режущих свойств за весь период эксплуатации инструмента. Наиболее существенным параметром, оказывающим износное воздействие на инструмент, является абразивность. Этому явлению посвящено много исследований [1, 2].

Для разработки методики ускоренных испытаний необходимо учесть весь опыт научных работ, проведенных отечественными и зарубежными исследователями. В работах [3–5] подробно рассмотрены результаты исследований инструмента на абразивную стойкость. Авторы отмечают важность проведения таких исследований с целью снижения стоимости буровых работ. Интернациональный авторский коллектив [6] рассмотрел процесс износа

Приведены результаты ускоренных испытаний буровых инструментов на надежность, прочность, износостойкость и сохранение режущих свойств. Предложены конструктивные решения режущих инструментов и конструкция экспериментальной установки с использованием весового метода контроля износа. На основе полученных результатов возможны создание математической модели процесса бурения и оптимизация стоимости выполнения данных работ.

**Ключевые слова:** надежность, твердые сплавы, инструментальные стали, твердость породы по Моосу, наложение вибраций, износ инструмента, ускоренные испытания, контроль геометрии, буровая установка

**DOI:** 10.17580/gzh.2022.11.06

инструментов на добычных машинах, используя технологию, разработанную во Франции. В работе [7] приводятся результаты сравнительных испытаний в зависимости от свойств породы. Результаты исследования, представленные в работе [8], отражают комплекс климатических испытаний строительных материалов и конструкций. В работе [9] приведены результаты взаимосвязи выветривания, твердости и влажности горной породы. В известном Токийском университете Гакугей выполнены исследования с применением переносимого твердомера Equotip [10], где ученым удалось получить достоверные результаты для девяти пород. Авторский коллектив [11] приводит результаты работы, отражающей связь твердости с другими физическими характеристиками породы, такими как коэффициент Пуассона, модуль упругости и др. Результаты этого исследования приведены для доломита, доломитовых известняков и сланцевых пород. В работе [12] авторы исследовали твердость породы непосредственно в забое на глубине 1900–2900 м. К недостаткам исследований следует отнести факт неучета изменения свойств породы при снятии горного давления.

Трещиноватость пород является одним из факторов, который одновременно благоприятно и отрицательно воздействует на инструмент. Трещиноватость снижает прочность породы и является причиной ударных воздействий на инструмент. Известная теория Гриффита и критерий Хука – Брауна являются приближенными методами определения трещиноватости при осевой нагрузке пород. В работе [13] рассмотрены критерии сопоставления результатов, полученных традиционными способами, и по методике, предложенной авторами, позволяющей достигнуть хорошей корреляции результатов между собой. Метод дискретных элементов (DEM), использованный в работе [14], широко распространен в исследованиях больших массивов численных данных. Результат определяется поставленной целью, например зависимость, связывающая крепость гранита с трещиноватостью.

В Альбертском университете (Канада) проведены исследования с применением статистического метода по составлению моделей, обеспечивающих выявление влияния циклических нагрузок на возникновение усталостных микротрещин [15]. Исследование взаимовлияния сжатия и растяжения на горную породу представлено в работе [16], где важным выводом является соотношение повторяющихся циклических растягивающих и сжимающих усилий на горную породу.

Микрошероховатость поверхностей излома породы тесно связана с таким показателем, как крепость по шкале проф. М. М. Протодяконова. Когда трещина достигает критического размера по ширине, возможно возникновение клина в виде свободного слоя воды, который при замерзании разрушает породу. Это утверждение вытекает из факта, что тонкий слой воды (несколько молекул) не замерзает при отрицательных температурах, а значит, явление расклинивания отсутствует. Необходимо учитывать, что трещины наноразмеров не влияют на разрушаемость породы, так как попавшая влага выступает в роли агента связи смыкаемых поверхностей трещины. Автором статьи [17] проведен анализ таких микротрещин. Установлено, что начало разрушения кристаллического тела связано с появлением трещины на субатомном уровне. Такая трещина по мере роста нагрузки достигает критического размера, и происходит хрупкое разрушение в зоне максимальной нагрузки.

В работах [18–21] авторы исследовали износ бурового инструмента в различных условиях для определения величины натурального износа.

В работе [22] рассмотрено взаимодействие индентора с породой. Оценены последствия этого взаимодействия при бурении скважин. Подтверждена необходимость изучения физических аспектов процесса разрушения скального грунта.

Наконечники инденторов и резцов буровых инструментов, как правило, оснащены твердосплавными пластинками ВК6, ВК8 и ВК8М. Эти твердосплавные материалы относятся к группе однокарбидной металлокерамики, где в качестве матрицы выступает кобальт 6–8 %, а остальная масса представляет собой WC (карбид вольфрама). В работах [23, 24] авторы исследовали надежность коронок, оснащенных однокарбидными пластинами ВК6 и ВК8 и двухкарбидными Т5К10, содержащими 5 % карбида титана (остальное – карбид вольфрама). Двухкарбидные твердые сплавы отличаются более высокой износостойкостью и повышенной хрупкостью.

Использование в качестве режущего инструмента инструментальных сталей оправдано в экономическом плане по причине снижения стоимости инструмента. Применение инструментов, выполненных из инструментальных сталей [25], наиболее целесообразно в условиях работы с наложением вибрации на процесс резания. Вибрация резко снижает износ инструмента. Индентор (резец) отличается высокой устойчивостью при работе с наложением вибрации. Поэтому практически весь виброударный инструмент можно выполнять из инструментальной быстрорежущей стали.

В последних авторских работах [26, 27] предложен проект виброударного полиинденторного бурового снаряда, в котором

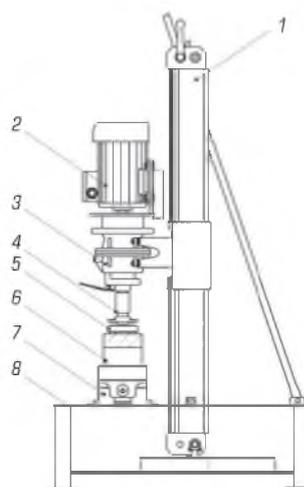
используют около ста виброударных инденторов. Для того, чтобы обеспечить их надежность, требуется проведение дополнительных лабораторных исследований наконечников. Практическое использование рекомендаций при проходке разведочных скважин было реализовано одним из авторов при трассировании магистрального газопровода «Сила Сибири».

### Методика ускоренных испытаний

При постановке задачи исследования были использованы соответствующие нормативные документы, в которых отражены нормативные параметры инструментов для горного бурения, материалов, надежности, а также методики испытаний.

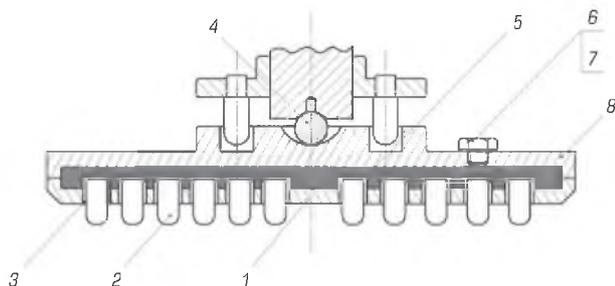
Целью работы является создание методики ускоренных испытаний режущего инструмента, применяемого в буровой технике. Основой для проведения испытаний является экспериментальная мобильная буровая установка. Применение такой установки обусловлено простотой проведения испытаний, надежностью и возможностью модернизации, что позволяет адаптировать установку к любым условиям. Для реализации способа ускоренных испытаний экспериментальная установка была изготовлена на базе мотобура КМ-10 с адаптацией для работы в лабораторных условиях путем замены двигателя внутреннего сгорания на электродвигатель. На рис. 1 показана схема установки с монтажным столом, содержащей испытательный блок, подставку и измерительную систему.

На рис. 2 показан испытательный блок для сравнительных испытаний режущих штырей. Для обеспечения надежности показателей износостойкости предложен многопозиционный элемент с установкой из 12–100 твердосплавных штырей. Равномерность прижатия инструментальных вставок обеспечивается применением гидропласта. Осевое давление равномерно распределяется между втулками, удерживающими твердосплавные штыри. Усилие прижатия отдельного штыря к породе определяется как частное от деления усилия, прикладываемого к динамометру, на число штырей. Статистические оценки износа определяли по стандартному расчету для выборки из 20 штырей. Сравнение износа по различным партиям штырей выполняли по таким



**Рис. 1. Экспериментальная установка:**

- 1 – стойка; 2 – двигатель;
- 3 – редуктор;
- 4 – вращатель;
- 5 – испытательный блок;
- 6 – динамометр;
- 7 – тиски с салазками;
- 8 – монтажный стол



**Рис. 2. Испытательный блок для сравнительных испытаний режущих штырей:**

1 – кассета; 2 – штырь; 3 – втулка; 4 – шар; 5 – гидропласт;  
6 и 7 – пробка и прокладка; 8 – фланец

показателям, как мода, медиана, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, математическое ожидание размаха, коэффициент вариации и доверительные оценки величины износа штырей.

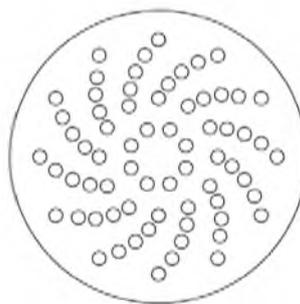
Исследование характера износа выполнено на электронном микроскопе Quanta 200 3D. Данный микроскоп позволяет осуществлять измерение объектов с отображением на экране монитора, полученным с использованием детекторов вторичных, обратнорассеянных электронов, внутрилинзового детектора и детекторов, работающих в режиме низкого вакуума. Данный прибор оснащен интегрированной системой Pegasus 2000 для рентгеноспектрального микроанализа (рентгеновский детектор Sapphire со сверхультратонким окном). С помощью данного микроскопа был определен химический состав твердого сплава и конструкционной стали конусов коронок.

Для обеспечения эффективности резания горной породы штыри расположены по спирали Архимеда (рис. 3). Благодаря смещению осей испытательного блока и вращателя обеспечивается неповторяющийся след резания породы, повышающий эффективность резания и достоверность результатов [27].

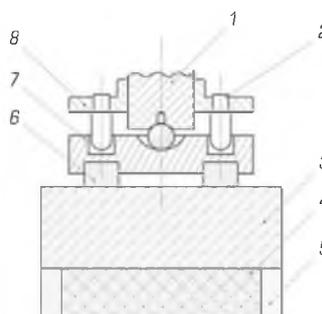
Схема испытаний твердосплавных пластинок и алмазных вставок буровых коронок показана на рис. 4. Основным методом измерения износа инструментов является весовой метод. Для этого были использованы аналитические весы AND GH-202, имеющие I класс точности (согласно ГОСТ 53228–2008), возможность выбора единиц измерения, различные режимы взвешивания, а также память на 200 измерений. Весы обладают встроенным интерфейсом RS-232C и программным обеспечением WinCT на CD-ROM.

Натурные испытания коронок и физическое моделирование по предложенной методике показали совпадающие результаты износа твердосплавных пластин для пород 5–8 категорий крепости по шкале проф. М. М. Протодяконова.

Поскольку данное исследование носит рамочный характер, измерение износа инструментов проводили весовым методом. Определение величины износа одновременно установленных в одной кассете инструментов имеет важное значение для сравнительных исследований их свойств, когда инструменты выполнены из различных инструментальных материалов. В рамках



**Рис. 3. Структура расположения штырей на испытательном блоке при испытании на стойкость (вид снизу)**



**Рис. 4. Установка по испытанию режущих элементов:**

1 – шпиндель;  
2 – поводок; 3 – горная порода; 4 – амортизатор;  
5 – опорный фланец;  
6 – резец;  
7 – испытательный блок;  
8 – фланец

данного исследования сравнительный износ инструментов не определяли. Предполагается, что в дальнейшем будут проведены такие испытания для сравнения степени износа инструментов, выполненных из твердого сплава, керамики, инструментальной стали и конструкционной закаленной стали.

Осевая нагрузка на каждый отдельно взятый инструмент составляла от 2 до 5 кг. Таким образом, общая нагрузка на кассету зависела от числа установленных в ней инструментов. Число перезарядок кассет будем считать числом циклов, которые, в свою очередь, будем полагать статистической выборкой. Всего таких выборок было  $N^* = 341$ . Суммарное число инструментов составило  $\sum n_i = 3521$ .

Математическое ожидание определим по формуле

$$M^* = \frac{\sum n_i}{N^*}. \quad (1)$$

Модальное значение инструментов составит  $M_0^* = 8$ .

Дисперсию и среднеквадратическое отклонение определяем по формулам:

$$D^* = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (t_i - \bar{T})^2; \quad (2)$$

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (t_i - \bar{T})^2}. \quad (3)$$

где  $m$  – число инструментов в кассете;  $t_i$  – величина износа  $i$ -го образца;  $\bar{T}$  – оценка математического ожидания и износа.

В результате подстановки числовых данных получим  $D^* = 71$ , следовательно,  $\sigma = \sqrt{D^*} = 11$ .

При этом коэффициент вариации рассчитывают по формуле  $K_V^* = \sigma^*/M^*$ . (4)

Правильность приведенных выше расчетов проверяли на образце из мрамора. Крепость пород определяли по шкале проф. М. М. Протодяконова. Разрушаемость пород устанавливали весовым методом в зависимости от твердости по шкале Мооса. Разрушаемость пород и износ инструмента исследовали на следующих породах: мел, гипс, кальцит, доломит, мрамор, лазурит, ортоклаз, кварц, шпинель, корунд, алмаз. Твердость материала снаряда измеряли с помощью твердомеров Бринелля и Роквелла.

Для сопоставимости результатов исследования все образцы обрабатывали и притирали до получения одинаковой шероховатости контактной поверхности с инструментом. Испытания проводили с сохранением постоянства осевой нагрузки в пределах, начиная с 100 кг/см<sup>2</sup>. Цикл испытаний каждого образца составлял 1000 ± 1 с. Величину износа инструмента контролировали с учетом его положения на диске и определяли как средний радиус траектории его движения по отношению к оси вращения. Вращатель обеспечивал частоту вращения образцов в пределах 100–400 мин<sup>-1</sup>.

Для сравнения полученных результатов испытаний горных пород и инструментов использовали стандартные испытания на машине трения МИ-1М. Машина позволяет проводить испытания материалов при трении качения по схеме вал-вал и вал-вставка. Наиболее близкой к теме исследования является статья [28], в которой авторы исследовали на износ материалы, применяемые для изготовления сельскохозяйственных машин. Методика, описываемая в настоящей статье, по отношению к работе [28] представляет собой зеркальное отражение конечных целей использования методик.

## Выводы

1. Целью данного исследования является создание и апробация методики ускоренных испытаний буровых инструментов.
2. Предложенная методика позволяет оценить долговечность буровых инструментов в зависимости от твердости, абразивности и крепости пород.
3. Результаты исследования дают возможность изменить конструкцию инструмента для существенного повышения скорости проходки скважин в различных геологических условиях.
4. В отдельных случаях применение алмазных и твердосплавных инструментов является неоправданным. Альтернативой служат инструменты, изготовленные из одноименной стали при условии наложения вибраций на них.
5. По результатам методики исследования была изготовлена серия буровых коронок, что позволило существенно повысить скорость проходки при бурении.
6. Работы по применению созданной методики для конкретных условий бурения продолжаются.
7. Научный коллектив Института наук о Земле, входящего в состав Белгородского государственного национального исследовательского университета, имеет большой опыт по созданию буровых снарядов для различных геологических условий и выполнения работ различного назначения. Кроме того, для проведения совместных исследований, обмена опытом и издания совместных публикаций Институт наук о Земле приглашает к сотрудничеству всех лиц, заинтересованных данной проблематикой.

## Библиографический список

1. Heinrichs J., Olsson M., Yvell K., Jacobson S. On the deformation mechanisms of cemented carbide in rock drilling – Fundamental studies involving sliding contact against a rock crystal tip // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2018. Vol. 77. P. 141–151.
2. Muminov R. O., Kuziev D. A., Zotov V. V., Szankova E. S. Performability of electro-hydro-mechanical rotary head of drill rig in open pit mining: A case-study // Eurasian Mining. 2022. No. 1. P. DOI: 10.17580/em.2022.01.16
3. Macias F. J., Dahl F., Bruland A. New Rock Abrasivity Test Method for Tool Life Assessments on Hard Rock Tunnel Boring: The Rolling Indentation Abrasion Test (RIAT) // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Iss. 5. P. 1679–1693.
4. Kupperle J., Röttger A., Alber M., Theisen W. Assessment of the LCPC abrasiveness test from the view of material science // Geomechanics and Tunneling. 2015. Vol. 8. Iss. 3. P. 211–220.
5. Plinninger R. J. Abrasiveness Assessment for Hard Rock Drilling // Geomechanics and Tunneling. 2008. Vol. 1. Iss. 1. P. 38–46.
6. Alber M., Yarali O., Dahl F., Bruland A., Käsling H. et al. ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014. Vol. 47. Iss. 1. P. 261–266.
7. Düllmann J., Alber M., Plinninger R. J. Determining soil abrasiveness by use of index tests versus using intrinsic soil parameters // Geomechanics and Tunneling. 2014. Vol. 7. Iss. 1. P. 87–97.
8. Coombes M. A., Feal-Pérez A., Naylor L., Wilhelm K. A non-destructive tool for detecting changes in the hardness of engineering materials: Application of the Equotip durometer in the coastal zone // Engineering Geology. 2013. Vol. 167. P. 14–19.
9. Moi L., Viles H. A. The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone // Earth Surface Processes and Landforms. 2012. Vol. 37. Iss. 3. P. 301–314.
10. Hisashi Aoki, Yukinori Matsukura. Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2008. Vol. 67. Iss. 1. P. 23–29.
11. Shalabi F. I., Cording E. J., Al-Hattamleh O. H. Estimation of rock engineering properties using hardness tests // Engineering Geology. 2007. Vol. 90. Iss. 3-4. P. 138–147.
12. Boutrid A., Bensihamdi S., Chettibi M., Talhi K. Strength hardness rock testing // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. Iss. 1. P. 95–110.
13. Hoek E., Martin C. D. Fracture initiation and propagation in intact rock – A review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2014. Vol. 6. Iss. 4. P. 287–300.
14. Scholtès L., Donzé F.-V. A DEM model for soft and hard rocks: Role of grain interlocking on strength // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2013. Vol. 61. Iss. 2. P. 352–369.
15. Nicksiar M., Martin C. D. Crack initiation stress in low porosity crystalline and sedimentary rocks // Engineering Geology. 2013. Vol. 154. P. 64–76.
16. Diederichs M. S. Manuel Rocha Medal Recipient Rock Fracture and Collapse Under Low Confinement Conditions // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2003. Vol. 36. Iss. 5. P. 339–381.
17. Enru Liu. Effects of fracture aperture and roughness on hydraulic and mechanical properties of rocks: implication of seismic characterization of fractured reservoirs // Journal of Geophysics and Engineering. 2005. Vol. 2. Iss. 1. P. 38–47.
18. Mussa A., Krakhmalev P., Bergström J. Sliding wear and fatigue cracking damage mechanisms in reciprocal and unidirectional sliding of high-strength steels in dry contact // Wear. 2020. Vol. 444-445. 203119. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203119

19. 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.
20. Abu Bakar M. Z., Majeed Y., Rostami J. Influence of moisture content on the LCPC test results and its implications on tool wear in mechanized tunneling // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. Vol. 81. P. 165–175.
21. Талеров М. П., Болотов В. И. Долговечность и виды отказов тангенциальных поворотных резцов // *Горный журнал*. 2018. № 4. С. 77–81. DOI: 10.17580/gzh.2018.04.14
22. 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.
23. Пинахин И. А., Черниговский В. А., Брацихин А. А., Ягмуров М. А., Сугаров Х. Р. и др. Исследование физико-механических свойств твердых сплавов ВК6, ВК8 и Т5К10, прошедших объемное импульсное лазерное упрочнение // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 3. С. 37–40.
24. Шахова К. И., Ковалевская А. Ю. Исследование и повышение надежности работы твердосплавных элементов буровых коронок // *ГИАБ*. 2004. № 4. С. 231–234.
25. Хайретдинов Э. Ф., Рааб Г. И., Набиуллин А. А., Бикбулатова В. З., Ситдииков В. Д. и др. Формирование структуры и свойств в инструментальной быстрорежущей стали методом холодной интенсивной деформации и последующей термической обработкой // *Material Physics and Mechanics*. 2016. Т. 27. № 2. С. 205–214.
26. Пелипенко Н. А., Игнатенко И. М. Вибродарный полиинденторный буровой снаряд // *ГИАБ*. 2019. № 9. С. 195–203.
27. Пелипенко Н. А., Процук И. С., Бакланов Р. Р. Результаты экспериментальных исследований процесса бурения // *Вестник Ассоциации буровых подрядчиков*. 2019. № 2. С. 41–44.
28. Гончаров П. Н., Коршунов В. Я. Методика проведения экспериментальных исследований износа образцов на машине трения МИ-1М // *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2014. № 3. С. 67–69. 

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 11, pp. 39–43  
DOI: 10.17580/gzh.2022.11.06

### Accelerated testing of rock and drilling tool interaction

#### Information about authors

N. A. Pelipenko<sup>1</sup>, Professor, Doctor of Engineering Sciences, pelipenkona@mail.ru

R. R. Baklanov<sup>1</sup>, Post-Graduate Student

<sup>1</sup>Belgorod State University, Belgorod, Russia

#### Abstract

The article describes the methods of accelerated reliability, strength, wear resistance and cutting capability testing of drilling tools. The design solutions are proposed for the comparative accelerated testing of cutting elements—plates, cutters, crowns, at their contact with rocks of various hardness and abrasiveness. The design of the experimental setup using the weight method of wear control with regard to geometric parameters of a tool is proposed. The nature and amount of wear are duplicated by testing samples on the machine MI-1M, which ensures satisfactory assessment of the wear rate. Based on the dependencies and patterns obtained, it is possible to create a mathematical model of the drilling process with the assessment of the reliability and durability of tools. The proposed approach allows optimizing the cost of drilling. In practice, the tools equipped with diamonds, hard-alloy plates and pins are often unjustifiably used, which is confirmed by the experimental studies. The accelerated tests are needed to determine the actual cutting parameters. It is noticed that a new tool is characterized by a higher productivity, which, with the wear of the tool, i.e. with the change in the geometry of the cutting part of the tool, decreases with the simultaneous increase in the torque and axial force of the tool. Tests of cutting tools on an experimental plant open up opportunities for improving the design of the tools, as well as for creating special mobile small-sized devices for periodic restoration of geometry of cutting elements immediately in operation. The proposed plant was designed by the scientists of the Applied Geology and Mining Department of the Belgorod State University and can be used by scientific organizations and production companies associated with rock drilling, including under a business contract.

**Keywords:** reliability, hard alloys, tool steels, Mohs rock hardness, vibration overlap, tool wear, accelerated testing, geometry control, jumbo.

#### References

1. Heinrichs J., Olsson M., Yvell K., Jacobson S. On the deformation mechanisms of cemented carbide in rock drilling—Fundamental studies involving sliding contact against a rock crystal tip. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018. Vol. 77. pp. 141–151.
2. Muminov R. O., Kuziev D. A., Zotov V. V., Szankova E. S. Performability of electro-hydro-mechanical rotary head of drill rig in open pit mining: A case-study. *Eurasian Mining*. 2022. No. 1. pp. 76–80. DOI: 10.17580/em.2022.01.16
3. Macias F. J., Dahl F., Bruland A. New Rock Abrasivity Test Method for Tool Life Assessments on Hard Rock Tunnel Boring: The Rolling Indentation Abrasion Test (RIAT). *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49, Iss. 5. pp. 1679–1693.
4. K pferle J., R ttger A., Alber M., Theisen W. Assessment of the LCPC abrasiveness test from the view of material science. *Geomechanics and Tunneling*. 2015. Vol. 8, Iss. 3. pp. 211–220.
5. Plinninger R. J. Abrasiveness Assessment for Hard Rock Drilling. *Geomechanics and Tunneling*. 2008. Vol. 1, Iss. 1. pp. 38–46.
6. Alber M., Yerali O., Dahl F., Bruland A., K sling H. et al. ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014. Vol. 47, Iss. 1. pp. 261–266.
7. D llmann J., Alber M., Plinninger R. J. Determining soil abrasiveness by use of index tests versus using intrinsic soil parameters. *Geomechanics and Tunneling*. 2014. Vol. 7, Iss. 1. pp. 87–97.

8. Coombes M. A., Feal-Perez A., Naylor L., Wilhelm K. A non-destructive tool for detecting changes in the hardness of engineering materials: Application of the Equotip durometer in the coastal zone. *Engineering Geology*. 2013. Vol. 167. pp. 14–19.
9. Mol L., Viles H. A. The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2012. Vol. 37, Iss. 3. pp. 301–314.
10. Hisashi Aoki, Yukinori Matsukura. Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2008. Vol. 67, Iss. 1. pp. 23–29.
11. Shalabi F. I., Cording E. J., Al-Hattamleh O. H. Estimation of rock engineering properties using hardness tests. *Engineering Geology*. 2007. Vol. 90, Iss. 3-4. pp. 138–147.
12. Boutrid A., Bensihamdi S., Chettibi M., Talhi K. Strength hardness rock testing. *Journal of Mining Science*. 2015. Vol. 51, Iss. 1. pp. 95–110.
13. Hoek E., Martin C. D. Fracture initiation and propagation in intact rock—A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014. Vol. 6, Iss. 4. pp. 287–300.
14. Scholt s L., Donz  F.-V. A DEM model for soft and hard rocks: Role of grain interlocking on strength. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2013. Vol. 61, Iss. 2. pp. 352–369.
15. Nicksiar M., Martin C. D. Crack initiation stress in low porosity crystalline and sedimentary rocks. *Engineering Geology*. 2013. Vol. 154. pp. 64–76.
16. Diederichs M. S. Manuel Rocha Medal Recipient Rock Fracture and Collapse Under Low Confinement Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2003. Vol. 36, Iss. 5. pp. 339–381.
17. Enru Liu. Effects of fracture aperture and roughness on hydraulic and mechanical properties of rocks: implication of seismic characterization of fractured reservoirs. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2005. Vol. 2, Iss. 1. pp. 38–47.
18. Mussa A., Krakhmalev P., Bergström J. Sliding wear and fatigue cracking damage mechanisms in reciprocal and unidirectional sliding of high-strength steels in dry contact. *Wear*. 2020. Vol. 444-445. 203119. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203119
19. 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.
20. Abu Bakar M. Z., Majeed Y., Rostami J. Influence of moisture content on the LCPC test results and its implications on tool wear in mechanized tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. Vol. 81. pp. 165–175.
21. Talerov M. P., Bolobov V. I. Life and failures of tangential-rotary picks. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 4. pp. 77–81. DOI: 10.17580/gzh.2018.04.14
22. Pelipenko 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.
23. Pinakhin I. A., Chernigovskiy V. A., Bratsikhin A. A., Yagmurov M. A., Sugarov Kh. R. et al. Complex study of physical and mechanical properties of VK6, VK8, and T5K10 hard alloys subjected to volumetric impulse laser hardening. *Industrial Laboratory*. 2017. Vol. 83, No. 3. pp. 37–40.
24. Shakhova K. I., Kovalovskaya A. Yu. Analysis and reliability enhancement of hard-alloy components of drill bits. *GIAБ*. 2004. No. 4. pp. 231–234.
25. Khayretdinov E. F., Raab G. I., Nabiullin A. A., Bikbulatova V. Z., Sittikov V. D. et al. Formation of the structure and properties of a high speed steel tool by severe plastic deformation and subsequent heat treatment. *Material Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 27, No. 2. pp. 205–214.
26. Pelipenko N. A., Ignatenko I. M. Vibropercussion polyindenter drilling assembly. *GIAБ*. 2019. No. 9. pp. 195–203.
27. Pelipenko N. A., Protsuk I. S., Baklanov R. R. Results of experimental research drilling process. *Vestnik assotsiatsii burovyykh podryadchikov*. 2019. No. 2. pp. 41–44.
28. Goncharov P. N., Korshunov V. Ya. Experimental research procedure for sample wear testing on friction machine MI-1M. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2014. No. 3. pp. 67–69.