

РАЗРАБОТКА БУРОВЫХ РЕЗЦОВ, АРМИРОВАННЫХ КУБИЧЕСКИМ НИТРИДОМ БОРА, И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ДЛЯ ИХ ИСПЫТАНИЯ

В.А. Корнеев

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия,
e-mail: korneev_va@list.ru

Аннотация: Изложены результаты испытаний экспериментальных конструкций буровых резцов, армированных кубическим нитридом бора. Осуществлена сравнительная оценка ресурса, скорости и энергоемкости бурения разработанным инструментом, а также серийными резцами. Установлено, что ресурс наиболее эффективной конструкции экспериментального бурового резца превышает ресурс стандартного резца с вольфрамо-кобальтовыми режущими пластинами более чем в 9 раз. При этом скорость бурения экспериментальным и серийным инструментом практически не отличаются. Установлено, что энергоемкость бурения разработанными резцами и серийным резцом отличается в пределах доверительного интервала. Исключение составляет экспериментальный резец с тремя перьями. Показана возможность повышения точности определения области применения инструмента посредством использования экспресс-метода оценки прочности горных пород, в которых производятся его исследования. Экспресс-метод был разработан на основе эмпирической зависимости между усилием, необходимым для внедрения индентора в стенку скважины, и прочностью горной породы. Приведены результаты испытаний горных пород и описание прибора для реализации разработанного экспресс-метода. Показаны преимущества предложенного экспресс-метода и представлены его существующие аналоги. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что использование разработанного экспресс-метода обеспечивает определение прочности осадочных и метаморфизованных горных пород с доверительным интервалом $\pm 22\%$.

Ключевые слова: буровые резцы, кубический нитрид бора, экспресс-метод определения прочности горной породы, скорость бурения, ресурс, энергоемкость, вращательное бурение шпуров, анкерное крепление.

Для цитирования: Корнеев В. А. Разработка буровых резцов, армированных кубическим нитридом бора, и методологических основ для их испытания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 116–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_116.

Development of drill cutters reinforced with cubic boron nitride and methodological bases for their testing

V.A. Korneyev

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, e-mail: korneev_va@list.ru

Abstract: The article presents the results of testing experimental designs of drill bits reinforced with cubic boron nitride. A comparative assessment of the resource, speed and energy intensity of drilling with the developed tool, as well as with serial cutters, was carried out. The resource of the most efficient design of the experimental drill cutter is more than 9 times longer than the resource of a standard cutter with tungsten-cobalt cutting inserts. The drilling speed of the experimental and serial tools is practically the same. The energy intensity of drilling with the developed cutters and the serial cutter differs within the confidence interval. An exception is the experimental cutter with three feathers. The accuracy of determining the scope of the tool can be improved by using the developed express method for assessing the strength of rocks. The express method was developed based on the empirical relationship between the force required to penetrate the indenter into the borehole wall and the strength of the rock. The article presents the results of testing rocks and a description of the device for implementing the developed express method. The article describes the advantages of the proposed express method and its existing analogues. The results of the conducted studies indicate that the use of the developed express method ensures the determination of the strength of sedimentary and metamorphosed rocks with a confidence interval of $\pm 22\%$.

Key words: drilling cutters, cubic boron nitride, express method for determining the strength of rock, drilling speed, resource, energy consumption, rotary drilling, anchoring.

For citation: Korneyev V. A. Development of drill cutters reinforced with cubic boron nitride and methodological bases for their testing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1):116-129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_116.

Введение

В процессе вращательного бурения горных пород происходит износ лезвий рабочего инструмента, интенсивность которого обусловлена следующими факторами: строением углепородного массива; действующими осевыми усилиями на резец; трением лезвий по разрушаемой породе; размерами инструмента и его геометрическими параметрами; температурой в зоне разрушения [1]. Производительность бурения при этом зависит как от технологических показателей режима бурения, так и от конструктивных параметров горного инструмента [2]. Особое влияние здесь оказывает степень износа лезвий буровых резцов, по мере которого происходит падение скорости бурения [3]. При определенном износе резцов вращательное бурение становится нерациональным. В этой связи одним из путей повышения эффектив-

ности вращательного бурения является поиск новых материалов для создания режущих вставок буровых резцов. Основным требованием к таким материалам является повышенная износостойкость.

К настоящему моменту применение материалов на основе карбидов вольфрама в качестве армирующих вставок для буровых резцов практически не имеет резервов по повышению износостойкости породоразрушающего инструмента и, соответственно, по увеличению скорости разрушения горных пород за счет применения высокопроизводительных режимов бурения. Таким образом, технологический прорыв здесь возможен лишь при условии замены вольфрамо-кобальтовых сплавов на современные сверхтвердые композиционные материалы (СТКМ).

В настоящий момент технология испытаний буровых резцов реализуется

посредством бурения кровли горных выработок исследуемым инструментом.

Данный подход требует наличия достоверных сведений о прочности разрушаемого массива, так как проведение испытаний без уточнения прочностных свойств породных слоев кровли может привести к большим погрешностям вследствие широкого диапазона изменения физико-механических свойств горных пород в пределах одного пласта под влиянием различных факторов окружающей среды.

Так, например, прочность при одноосном сжатии алевролитов и аргиллитов пласта «Поленовский» шахты имени Кирова изменяется от 20 до 60 МПа, т.е. в 3 раза. Прочность песчаников данного пласта колеблется от 40 до 100 МПа, т.е. изменяется в 2,5 раза.

Временное сопротивление сжатию песчаников пласта 21 шахты Ольжераская изменяется от 40,4 до 146 МПа (более чем в 3 раза), алевролитов — от 21,7 до 99 МПа (более чем в 4,5 раза), гравелитов — от 34,4 до 117,8 МПа (более чем в 3 раза).

Следует также отметить, что погрешность в определении механических свойств горных пород оказывает негативное влияние не только при разработке горного инструмента, но и зачастую приводит к нерациональному применению горных машин вследствие зависимости их конструктивных параметров от физико-механических свойств разрушаемых объектов [4, 5].

Учитывая вышеизложенное, можно констатировать, что повышение эффективности вращательного бурения шпуров требует не только создания новых образцов буровых резцов на основе СТКМ, но также и разработки методологических основ проведения их испытаний, основой которых должен являться экспресс-метод определения прочности горных пород.

Методы

За рубежом при ведении горных работ в настоящее время наибольшее распространение получили экспресс-методы определения прочности горных пород посредством молотка Шмидта (Method for Determination of the Schmidt Hammer) [6, 7] и испытанием образца породы точечной нагрузкой на специальном приборе (Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock) [8]. Данные методы регламентируются и рекомендуются к применению Международным обществом по механике горных пород (ISRM).

В основе принципа действия молотка Шмидта лежит взаимосвязь между высотой отскока бойка при создании ударного импульса по породе с заданным усилием и ее прочностью. Определение прочностных свойств осуществляется посредством построения корреляционных зависимостей [9]. Данный метод первоначально нашел широкое применение в строительстве для определения прочности бетона, однако в дальнейшем стал применяться также и в горном деле [10, 11].

Следует отметить, что значительная неоднородность горных пород вносит большую погрешность при оценке их прочности с помощью молотка Шмидта. При этом исследование скальных пород требует обязательной тарировки молотка для каждого вида породы на каждом конкретном месторождении [12, 13].

В соответствии с методом точечной нагрузки определение прочности горной породы осуществляется посредством разрушения образца между конических пуансонов. Исходным параметром для вычисления прочности является усилие, необходимое для раскалывания породы. На основании его величины производится определение индекса прочности испытанной породы с дальнейшим вычислением предела прочности при од-

ноосном сжатии и растяжении по корреляционным зависимостям. В качестве образцов горной породы могут использоваться керны, которые в соответствии с методом могут быть разрушены аксиальным или диаметральной приложением нагрузки. Метод также может быть реализован на образцах кусковой формы [8, 14].

В настоящее время метод точечной нагрузки нашел широкое применение в горной отрасли для решения производственных задач в различных странах мира [15]. Так, исследовательское подразделение немецкой машиностроительной компании Thyssen Krupp Fördertechnik успешно применяет данный метод для оценки механических свойств пород различных месторождений при проектировании для них горных машин. При этом используется специально разработанное в компании программное обеспечение для обработки результатов испытаний образцов горных пород [16, 17]. Программное обеспечение позволяет вычислять такие характеристики, как индекс прочности горной породы, средние и максимальные значения прочности на растяжение и сжатие, наклон регрессионной прямой, параметр разброса прочности, а также энергетические затраты на разрушение горной породы.

Следует указать, что применительно к решению задачи по определению прочности породных слоев кровли горной выработки использование метода точечной нагрузки возможно лишь посредством испытания выбуренных кернов. При этом необходимость учета слоистой структуры осадочных горных пород, а также распиловки кернов до требуемых стандартом размеров усложняет проведение исследований.

В России наибольшее распространение при решении горно-технологических задач получили экспресс-метод определения коэффициента крепости горных

пород по ГОСТ 21153.1-75 и экспресс-метод определения контактной прочности, регламентируемый ГОСТ Р 50834-95.

Коэффициент крепости горной породы в соответствии с ГОСТ 21153.1-75 вычисляется на основании объема фракции горной породы после просеивания, образованной дроблением образца эталонной гирей. Метод реализуется с помощью специального прибора ПОК-1.

Недостатком метода является низкая точность, а также необходимость подготовки керна к проведению испытаний посредством разделения на образцы регламентируемого объема.

Контактная прочность в соответствии с ГОСТ Р 50834-95 вычисляется на основании величины усилий, необходимых для разрушения образца горной породы двумя инденторами в форме усеченного конуса с различным диаметром оснований. Согласно данному экспресс-методу определение контактной прочности возможно осуществлять и вдавливанием индентора в стенку скважины, что позволяет устанавливать прочностные свойства породных прослоек кровли. Однако взаимодействие индентора в виде усеченного конуса с цилиндрической поверхностью стенки скважины приводит к образованию концентратора напряжений и разрушению горной породы при меньшем усилии, что искажает результаты измерений в сравнении с контактной прочностью, установленной при испытании образца.

Этот недостаток был устранен в экспресс-методе, разработанном в Институте угля СО РАН [18]. Отличительной особенностью метода является использование индентора со сферической контактной поверхностью. Аналитическое обоснование нового экспресс-метода было дано Н.В. Черданцевым, В.Т. Преслером и В.Е. Ануфриевым на основании классической задачи Г. Герца [19]. Для реализации метода авторами



Рис. 1. Лабораторная версия устройства «Прочностномер ПСШ-1»
Fig. 1. Laboratory version of the device «Strength meter PSSH-1»

был предложен прибор, который получил название «Пинометр» [20]. Однако разработчики экспресс-метода так и не установили корреляционной зависимости для определения прочности породы на основании параметров ее разрушения индентором.

Следует также отметить, что используемый в приборе индентор имеет значительный диаметр (10 мм) [19], что затрудняет применение экспресс-метода для исследования особо крепких горных пород.

Сложившаяся ситуация показала отсутствие экспресс-метода и технического устройства для его реализации, удовлетворяющих требованиям оперативного уточнения прочностных свойств породных прослоек кровли горных выработок при проведении испытаний буровых резцов. Экспресс-метод, соответствующий данным требованиям, был разработан автором настоящей статьи. В соответствии с ним предел прочности горной породы устанавливается на основании усилия, необходимого для внедрения индентора формы Г67 по ГОСТ 880-75 на глубину 0,5 мм в горную породу, в стенку скважины, пробуренной в кровле алмазной буровой коронкой диаметром 56 мм.

Использование алмазной коронки обеспечивает приемлемую точность экспресс-метода, так как обеспечивает формирование поверхности скважины без концентрических борозд, образующихся в случае бурения резцовым инструментом. В результате этого контактные

условия при проведении измерений различных пород остаются неизменными.

Для реализации механизма контактного разрушения горной породы в скважине в соответствии с данным экспресс-методом было разработано специальное устройство «Прочностномер ПСШ-1», лабораторная версия которого приведена на рис. 1. Устройство состоит из силового гидроцилиндра 1, имеющего гидравлическую связь с измерительным гидроцилиндром 2. Индентор для разрушения горной породы соединен со штоком силового гидроцилиндра 1 и приводится в движение за счет подачи в силовой гидроцилиндр 1 рабочей жидкости через рукав 3. Наличие при этом гидравлической связи между силовым 1 и измерительным гидроцилиндром 2 обеспечивает отслеживание положения индентора за счет датчика перемещения, взаимодействующего со штоком измерительного гидроцилиндра 2.

Корреляционная зависимость, связывающая усилие на инденторе, необходимое для его внедрения в горную породу на глубину 0,5 мм, и ее предел прочности при одноосном сжатии, была установлена на основании экспериментальных данных, полученных при испытании образцов горных пород. При этом в образце выбуривалось алмазной буровой коронкой перпендикулярно к напластованию отверстие диаметром 56 мм для установки устройства «Прочностномер ПСШ-1» (рис. 2, а).

Далее проводилось индентирование образца прибором (рис. 2, б) не менее

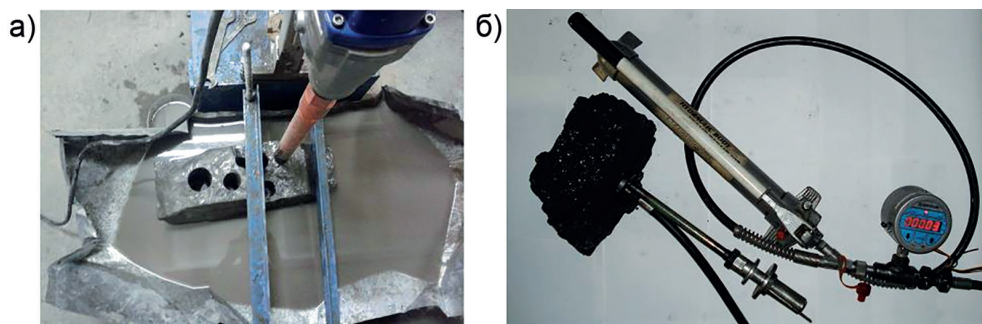


Рис. 2. Выбуривание отверстия в образце алевролита (а), испытание образца угля устройством «Прочностномер ПСШ-1» (б)

Fig. 2. Drilling a hole in a siltstone sample (a), testing a coal sample with a «Strength meter PSSH-1» (b)

6 раз с доверительным интервалом, не превышающим 20%, а также определялся предел прочности горной породы при одноосном сжатии в соответствии с ГОСТ 21153.2-84.

Как было показано в работе [21], основной причиной выхода из строя буровых резцов является затупление режущих вольфрамокобальтовых вставок, что актуализирует исследования, направленные на применение новых материалов для армирования горного инструмента. Наиболее перспективными среди таких материалов являются сверхтвердые композиты.

Сверхтвердые композиционные материалы, выпускаемые в промышленных масштабах, используют в своей основе кубический нитрид бора или синтетический алмаз [22].

Основным достоинством синтетических алмазов является наибольшая твердость среди всех сверхтвердых материалов. Благодаря этому алмазный инструмент обладает высокой абразивной стойкостью и успешно применяется в горной отрасли и обработке цветных металлов и их сплавов [23]. Однако существенным недостатком технических алмазов является низкая термическая стойкость, что препятствует применению таких композитов при температурах выше 400 °C [24].

Для создания бурового инструмента в настоящее время используются алмазные композиционные материалы с двухслойной структурой. Получение таких композитов осуществляется при высоких давлениях, порядка 6–8 ГПа, и температурах 1400–1600 °C. Алмазосодержащий слой в композитах формируется посредством связки Co–WC–C, которая инфильтрируется из подложки на основе спеченного карбида вольфрама [24].

Основным недостатком таких режущих вставок являются существенные ограничения в выборе режима работы инструмента, что обусловлено присутствием кобальта в алмазном слое, который снижает термостойкость композита. Температура нагрева лезвия режущих пластин при значительных скоростях резания может достигать до 700 °C, что приводит к быстрому термическому и химическому износу инструмента [24].

Сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора лишены этих ограничений, и незначительно уступают алмазным композитам по твердости. Они имеют отличную стойкость к ударным нагрузкам и обладают низким коэффициентом деформации при работе в условиях высоких температур [22]. В этой связи исследования возможности использования таких композитов для армирования буровых резцов являются

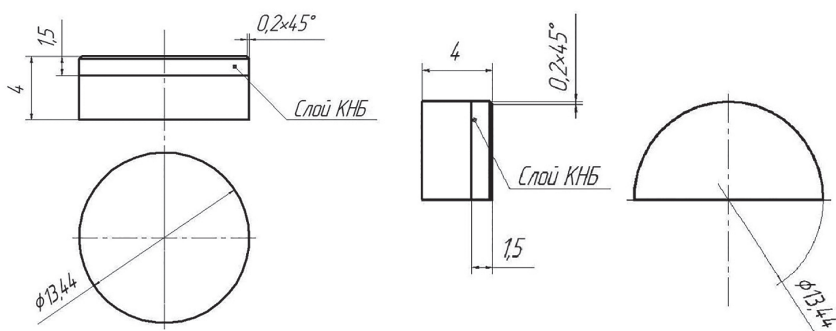


Рис. 3. Конструкция режущих пластин, применяемых в экспериментальных буровых резцах
Fig. 3. Design of cutting inserts used in experimental drilling cutters

актуальными и обладают практической значимостью для горной промышленности.

Для проведения исследований был выбран композит с высоким содержанием (более 70 масс.%) кубического нитрида бора (КНБ) cBN-Al-TiC. Режущие вставки были выполнены круглой и полукруглой формы и представляли собой твердосплавные пластины, покрытые слоем КНБ (рис. 3). На основе данных вставок были изготовлены двухперые и трехперые буровые резцы диаметром 28 мм (рис. 4, а-в). С целью проведения сравнительной оценки в исследованиях также использовались серийные резцы РПУ-30/М16 (рис. 4, г).

Эксперименты по исследованию разработанных экспериментальных конструкций буровых резцов были осуществ-

лены на лабораторном буровом стенде в условиях ООО «Горный инструмент» (г. Новокузнецк) и на производственных установках на горнодобывающих предприятиях АО «Распадская-Коксовая» (г. Междуреченск), ООО «Шахта Алардинская» (г. Калтан) и ОАО «УК «Нерюнгриуголь» — шахта «Денисовская» (г. Нерюнгри). Коэффициент крепости разрушаемых горных пород и бетонных блоков, используемых при бурении на лабораторном стенде, составил 8–9 по шкале М.М. Протодяконова.

Результаты

Графическое представление зависимости, связывающей усилие на инденторе, необходимое для его внедрения в горную породу на глубину 0,5 м, и ее предел прочности при одноосном сжа-

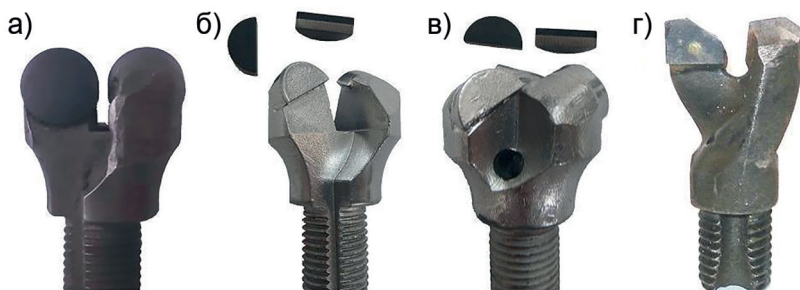


Рис. 4. Экспериментальные конструкции буровых резцов: двухперых с круглой вставкой (Тип 1) (а); двухперых с полукруглой вставкой (Тип 2) (б); трехперых (Тип 3) (в); серийного резца (Тип 4) (г)

Fig. 4. Experimental designs of drilling cutters: two-bladed with a round insert (Type 1) (a); two-bladed with a semicircular insert (Type 2) (b); three-bladed (Type 3) (v); a serial cutter (Type 4) (g)

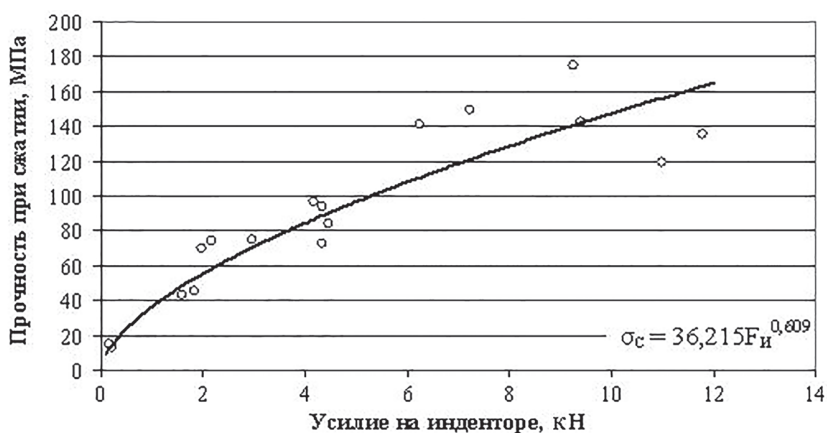


Рис. 5. Корреляционная связь между усилием на инденторе, необходимым для его внедрения на глубину 0,5 мм в горную породу и ее пределом прочности при одноосном сжатии

Fig. 5. Correlation between the force on the indenter necessary for its penetration to a depth of 0,5 mm into the rock and its uniaxial compressive strength

тии, приведено на рис. 5. Аппроксимация данной зависимости позволяет записать корреляционное уравнение в следующем виде:

$$\sigma_c = 36,215 F_n^{0,609}, \quad (1)$$

где σ_c — предел прочности горной породы при одноосном сжатии, МПа; F_n — усилие на инденторе устройства «Прочностномер ПСШ-1», необходимое для его внедрения на глубину 0,5 мм в горную породу, в скважине диаметром 56 мм, кН.

Перечень образцов горных пород, на основании испытаний которых была установлена зависимость (1), приведен в таблице. Также в ней указано отклонение величины предела прочности при одноосном сжатии, определенной в соответствии с разработанным экспресс-методом, от значения, установленного в соответствии с ГОСТ 21153.2-84.

Проведенные испытания экспериментальных конструкций буровых резцов на основе кубического нитрида бора показали, что буровой резец *Tuna 1* обладает наибольшим ресурсом среди всех разработанных резцов. Высокую износостойкостью также имеют и остальные двухперые экспериментальные резцы

(*Tun 2*, *Tun 3*). Скорость бурения экспериментальными двухперыми резцами и серийным резцом *Tuna 4* оказалась практически одинаковой и составила около 26,5 мм/с. Бурение трехперым резцом *Tuna 3* в процессе испытаний было прекращено из-за недостатка усилия подачи, обеспечиваемого буровой установкой [25]. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о возможности создания эффективных конструкций буровых резцов на основе кубического нитрида бора.

Результаты проведенных исследований показывают, что использование разработанного экспресс-метода обеспечивает определение прочности осадочных и метаморфизованных горных пород с доверительным интервалом $\pm 22\%$. Данный доверительный интервал также справедлив и в большинстве случаев при исследовании магматических пород. Исключением в проведенных исследованиях стал красный ортоклазовый гранит, обладающий значительной неоднородностью, выраженной размерами окрашенных областей, содержащих различные по своему составу минеральные зерна.

Оценка отклонения значения предела прочности горной породы при одноосном сжатии, установленного экспресс-методом, от значения, определенного по ГОСТ 21153.2-84
Evaluation of the deviation of the value of the uniaxial compressive strength of the rock, established by the express method, from value determined in accordance with GOST 21153.2-84

Горная порода	Предел прочности при одноосном сжатии, установленный в соответствии с разработанным экспресс-методом, МПа	Предел прочности при одноосном сжатии, установленный в соответствии с ГОСТ 21153.2-84, МПа	Величина отклонения результатов экспресс-метода от ГОСТ, %
Уголь (шахта «Ольджерасская», пласт 21-1-11, марка ГЖО)	14,66	13,00	12,78
Уголь (шахта «им. Кирова», пласт Поленовский, марка ГЖ)	11,90	15,00	-20,66
Песчаник (разрез «Талдинский», пласт 67)	162,62	135,25	20,24
Углистый аргиллит (шахта «им. Кирова», пласт Поленовский)	54,87	70,00	-21,61
Алевролит крупнозернистый (Терсинский район Кемеровской области, Макарьевское месторождение каменного угля)	88,59	93,40	-5,15
Песчаник (Терсинский район Кемеровской области, Макарьевское месторождение каменного угля)	86,42	96,55	-10,49
Алевролит (шахта «Алардинская», вентиляционный штрек 3-14)	70,36	75,00	-6,19
Песчанистый алевролит (разрез «Талдинский», пласт 84-86)	57,85	74,02	-21,84
Песчаник (шахта «Ольджерасская», пласт 21-1-11)	52,39	45,00	16,42
Аргиллит (разрез «Талдинский», пласт 67)	48,23	43,10	11,89
Мрамор розовый	88,50	72,57	21,96
Мрамор бледно-розовый	89,86	83,83	7,20
Лабродорит	140,49	174,79	-19,62
Гранит серо-зеленый	141,74	141,99	-0,18
Гранит красный ортоклазовый	155,86	118,76	31,23
Гранит серый	120,88	149,26	-19,01
Гранит бледно-коричневый	110,46	140,76	-21,53

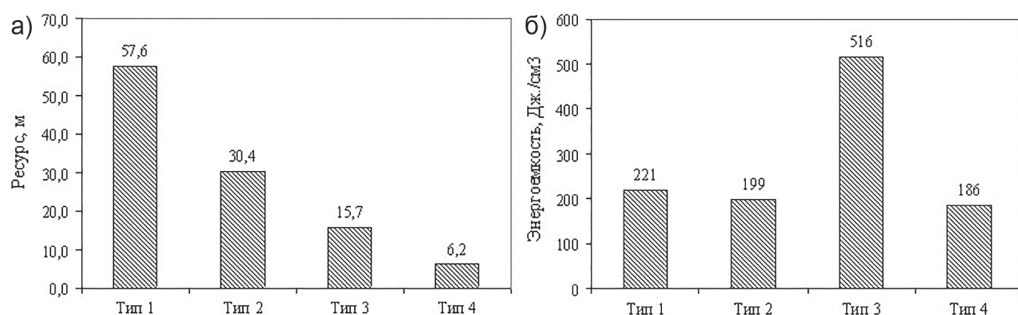


Рис. 6. Результаты испытаний разработанных конструкций буровых резцов: ресурс (а); энергоемкость бурения (б)

Fig. 6. Research results of the developed designs of drilling cutters: resource (a); energy intensity of drilling (b)

Обсуждение результатов

Анализируя энергоемкость работы испытанного горного инструмента, стоит отметить, что бурение резцом *Tuna 3* потребовало наибольших энергетических затрат, которые превышают более чем в 2 раза данный показатель работы остальных резцов. При этом энергоемкость бурения двухперыми экспериментальными резцами отличается от параметров работы стандартного инструмента в пределах статистической ошибки (рис. 6, б).

Заключение

Апробация разработанного экспресс-метода была осуществлена в условиях ООО «Абаканский рудник» (г. Абаза) посредством определения прочности рудного тела на горизонте –200 м. Прочность руды при одноосном сжатии в соответствии с данными геологоразведочных работ для данного горизонта составляет порядка 128,282 МПа. Дополнительный отбор образцов руды с горизонта с дальнейшим их испытанием в профильной лаборатории показал величину предела прочности при одноосном сжатии руды в 145,5 МПа. При этом прочность рудного тела на данном горизонте, установленная с помощью разработанного экспресс-метода и устройства «Прочностномер ПСШ-1», составила 150,27 МПа. Таким образом, от-

клонение результата измерений посредством разработанного экспресс-метода от данных геологоразведочных работ и испытаний в профильной лаборатории составило 17,14% и 3,28% соответственно. Величина отклонений укладывается в установленный в экспресс-методе доверительный интервал в $\pm 22\%$. Таким образом, разработанный экспресс-метод может быть использован для уточнения прочности породных слоев кровли, в которой осуществляется бурение испытываемыми буровыми резцами.

Положительный опыт апробации на руднике также указывает на наличие перспектив использования описанного экспресс-метода при решении задач проектирования, исследования и оптимизации конструкций буровых коронок и горных машин ударного действия [26, 27].

Результаты проведенных исследований свидетельствуют и о возможности значительно повысить ресурс буровых резцов без значительного ухудшения других технологических характеристик работы инструмента посредством армирования лезвий буровых резцов кубическим нитридом бора. При этом высокая термическая стойкость композитов на основе КНБ позволяет эксплуатировать горный инструмент в сочетании с высокопроизводительными режимами бурения при температурах до 900 °С в зоне резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев П. А., Корнеев В. А. Особенности процесса разрушения углепородного массива при вращательном бурении инструментом, оснащенным твердосплавными вставками // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2019. — № 3. — С. 39–46.
2. Rostamsowlat I., Richard T., Evans B. An experimental study of the effect of back rake angle in rock cutting // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, vol. 107, pp. 224–232. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.046.
3. Voyiadjis G. Z., Yaneng Zhou Numerical modeling of frictional contact between a blunt tool and quasi-brittle rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019, vol. 52, no. 10, pp. 3771–3790. DOI: 10.1007/s00603-019-01800-0.
4. Тимофеев Е. Г., Теплякова А. В., Жуков И. А., Голиков Н. С. Автоматизированный метод проектирования бойков ударных машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 259–271. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_257.
5. Теплякова А. В., Жуков И. А., Мартюшев Н. В. Применение бурильных машин с ударным кулачковым механизмом в различных горно-геологических условиях // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3(53). — С. 501–511. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-501-511.
6. Aydin A. ISRM suggested method for determination of the schmidt hammer rebound hardness: Revised version // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2009, vol. 46, pp. 627–634. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.01.020.
7. Le Tien-Thinh, Skentou Athanasia D., Mamou Anna, Asteris Panagiotis G. Correlating the unconfined compressive strength of rock with the compressional wave velocity effective porosity and schmidt hammer rebound number using artificial neural networks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2022, vol. 55, no. 11, pp. 6805–6840. DOI: 10.1007/s00603-022-02992-8.
8. Jamshidi Amin A comparative study of point load index test procedures in predicting the uniaxial compressive strength of sandstones // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2022, vol. 55, no. 7, pp. 4507–4516. DOI: 10.1007/s00603-022-02877-w.
9. Wang M., Wan W. A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, vol. 123, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104094.
10. Aydin A., Basu A. The Schmidt hammer in rock material characterization // Engineering Geology. 2005, vol. 81, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.06.006.
11. Прокопов А. Ю., Гергарт Ю. А. Аprobация и оценка точности неразрушающего экспресс-метода определения прочностных свойств породного массива в условиях реконструкции Рокского тоннеля // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2015. — № 4. — С. 101–107.
12. Харисов Т. Ф. Оценка предела прочности пород в образце с использованием молотка Шмидта // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2020. — № 4. — С. 304–314.
13. Харисов Т. Ф., Панжин А. А., Харисова О. Д. О проблемах экспресс-метода определения прочности горных пород // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2019. — № 7. — С. 86–91. DOI: 10.25635/q9637-9421-1804-p.
14. Singh V. K., Singh D. P. Correlation between point load index and compressive strength for quartzite rocks // Geotechnical and Geological Engineering. 1993, vol. 11, pp. 269–272.
15. Bieniawski Z. T. The point-load test in geotechnical practice // Engineering Geology. 1975, vol. 9, no. 1. DOI: 10.1016/0013-7952(75)90024-1.
16. Машуков И. В., Раац В., Залеская О. В., Малофеев Д. В., Кравченко А. Е. Исследование прочностных свойств горных пород методом сосредоточенной нагрузки на горнорудных предприятиях // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2014. — № 1. — С. 101–104.

17. Машуков И. В., Залеская О. В., Малофеев Д. В., Матвеев А. В. Исследование прочностных свойств горных пород методом сосредоточенной нагрузки (PLT) / Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». — Кемерово, 2013. — С. 41–44.

18. Ануфриев В. Е., Денискин Н. Ф., Федоринин В. Н., Цыцаркин В. Н. Экспресс-метод определения прочностных и деформационных свойств пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 2. — С. 77–82.

19. Черданцев Н. В., Преслер В. Т., Ануфриев В. Е. Обоснование способа определения механических характеристик массива горных пород в натурных условиях // Вестник КузГТУ. — 2011. — № 6(88). — С. 6–12.

20. Абрамов И. Л., Майоров А. Е. Совершенствование средств оперативного измерения контактной прочности горных пород приконтурной зоны массива // Вестник НЦ ВостНИИ. — 2018. — № 4. — С. 74–79.

21. Корнеев В. А., Корнеев П. А., Крестовоздвиженский П. Д., Пугачев Е. В. Совершенствование конструкций буровых резцов // Горный журнал. — 2020. — № 12. — С. 67–70. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.15.

22. Анохин А. С., Стрельникова С. С., Кукуева Е. В., Шипков А. Н., Ткаченко В. В., Никитенко С. М. Свойства крупноразмерных заготовок сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора // Стекло и керамика. — 2015. — № 8. — С. 26–29.

23. Kolodnits'kyi V. M., Bagirov O. E. On the structure formation of diamond-containing composites used in drilling and stone-working tools (A review) // Journal of Superhard Materials. 2017, vol. 39, no. 1. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457617010014>. DOI: 10.3103/S1063457617010014.

24. Никитенко С. М., Кольба А. В., Анохин А. С., Кукуева Е. В. Перспективы применения сверхтвердых материалов и износостойких сплавов для породоразрушающего инструмента // Стекло и керамика. — 2015. — № 12. — С. 27–34.

25. Dvornikov L. T., Kushin V. I., Nikitenko S. M., Korneyev V. A. Experimental designs of a combined tool using superhard composite materials for effective destruction of mine rocks // Eurasian Mining. 2018, vol. 1, no. 29, pp. 22–26. DOI: 10.17580/em.2018.01.05.

26. Третьяк А. А., Гроссу А. Н., Борисов К. А. Влияние конструктивных особенностей коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами, на эффективность бурения горных пород // Горный журнал. — 2018. — № 2. — С. 85–90. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.12.

27. Теплякова А. В., Азимов А. М., Алиева Л., Жуков И. А. Обзор и анализ технических решений для повышения долговечности и улучшения технологичности элементов ударных узлов бурильных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 9. — С. 120–132. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_120. **ПЛАТ**

REFERENCES

1. Korneev P. A., Korneev V. A. Peculiarities of the destruction process of a coal-rock mass during rotary drilling with a tool equipped with hard-alloy inserts. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2019, no. 3, pp. 39–46. [In Russ].

2. Rostamsowlat I., Richard T., Evans B. An experimental study of the effect of back rake angle in rock cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 107, pp. 224–232. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.046.

3. Voyiadjis G. Z., Yaneng Zhou Numerical modeling of frictional contact between a blunt tool and quasi-brittle rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, no. 10, pp. 3771–3790. DOI: 10.1007/s00603-019-01800-0.

4. Timofeev E. G., Teplyakova A. V., Zhukov I. A., Golikov N. S. Automated method of designing anvil-blocks of impact machines based on the physical and mechanical properties of

destroyed objects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12-2, pp. 259 – 271. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_257.

5. Teplyakova A. V., Zhukov I. A., Martyushev N. V. Application of drilling machines with impact cam mechanism in various mining and geological conditions. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3(53), pp. 501 – 511. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-501-511.

6. Aydin A. ISRM suggested method for determination of the schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2009, vol. 46, pp. 627 – 634. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.01.020.

7. Le Tien-Thinh, Skentou Athanasia D., Mamou Anna, Asteris Panagiotis G. Correlating the unconfined compressive strength of rock with the compressional wave velocity effective porosity and schmidt hammer rebound number using artificial neural networks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 11, pp. 6805 – 6840. DOI: 10.1007/s00603-022-02992-8.

8. Jamshidi Amin A comparative study of point load index test procedures in predicting the uniaxial compressive strength of sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 7, pp. 4507 – 4516. DOI: 10.1007/s00603-022-02877-w.

9. Wang M., Wan W. A new empirical formula for evaluating uniaxial compressive strength using the Schmidt hammer test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, vol. 123, pp. 1 – 11. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104094.

10. Aydin A., Basu A. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*. 2005, vol. 81, no. 1, pp. 1 – 14. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.06.006.

11. Prokopov A. Ju., Gergart Ju. A. Approbation and assessment of the accuracy of a non-destructive express method for determining the strength properties of a rock mass under the conditions of the reconstruction of the Roki Tunnel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2015, no. 4, pp. 101 – 107. [In Russ].

12. Kharisov T. F. Evaluation of the ultimate strength of rocks in a sample using a Schmidt hammer. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 4, pp. 304 – 314. [In Russ].

13. Kharisov T. F., Panzhin A. A., Kharisova O. D. On the problems of the express method for determining the strength of rocks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2019, no. 7, pp. 86 – 91. [In Russ]. DOI: 10.25635/q9637-9421-1804-p.

14. Singh V. K., Singh D. P. Correlation between point load index and compressive strength for quartzite rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*. 1993, vol. 11, pp. 269 – 272.

15. Bieniawski Z. T. The point-load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*. 1975, vol. 9, no. 1. DOI: 10.1016/0013-7952(75)90024-1.

16. Mashukov I. V., Raac V., Zaleskaja O. V., Malofeev D. V., Kravchenko A. E. The study of the strength properties of rocks by the method of concentrated load at mining enterprises. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2014, no. 1, pp. 101 – 104. [In Russ].

17. Mashukov I. V., Zaleskaja O. V., Malofeev D. V., Matveev A. V. The study of the strength properties of rocks by the method of concentrated load (PLT). *Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energeticheskaya bezopasnost' Rossii. Novye podkhody k razvitiyu ugol'noy promyshlennosti»* [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Energy Security of Russia. New approaches to the development of the coal industry»], Kemerovo, 2013, pp. 41 – 44. [In Russ].

18. Anufriev V. E., Deniskin N. F., Fedorinin V. N., Cycarkin V. N. Express method for determining the strength and deformation properties of rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2004, no. 2, pp. 77 – 82. [In Russ].

19. Cherdancev N. V., Presler V. T., Anufriev V. E. Justification of the method for determining the mechanical characteristics of a rock mass in natural conditions. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2011, no. 6(88), pp. 6 – 12. [In Russ].

20. Abramov I. L., Majorov A. E. Improving the means of operational measurement of the contact strength of rocks in the near-contour zone of the massif. *Bulletin of Scientific center VostNIi*. 2018, no. 4, pp. 74 – 79. [In Russ].

21. Korneev V. A., Korneev P. A., Krestovozdvizhenskij P. D., Pugachev E. V. Improvement of designs of drilling cutters. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 12, pp. 67 – 70. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.15.

22. Anohin A. S., Strel'nikova S. S., Kukueva E. V., Shipkov A. N., Tkachenko V. V., Nikitenko S. M. Properties of large blanks of superhard composites based on cubic boron nitride. *Glass and ceramics*. 2015, no. 8, pp. 26 – 29. [In Russ].

23. Kolodnits'kiy V. M., Bagirov O. E. On the structure formation of diamond-containing composites used in drilling and stone-working tools (A review). *Journal of Superhard Materials*. 2017, vol. 39, no. 1. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457617010014>. DOI: 10.3103/S1063457617010014.

24. Nikitenko S. M., Kol'ba A. V., Anohin A. S., Kukueva E. V. Prospects for the use of superhard materials and wear-resistant alloys for rock cutting tools. *Glass and ceramics*. 2015, no. 12, pp. 27 – 34. [In Russ].

25. Dvornikov L. T., Kushin V. I., Nikitenko S. M., Korneyev V. A. Experimental designs of a combined tool using superhard composite materials for effective destruction of mine rocks. *Eurasian Mining*. 2018, vol. 1, no. 29, pp. 22 – 26. DOI: 10.17580/em.2018.01.05.

26. Tret'yak A. A., Grossu A. N., Borisov K. A. The influence of the design features of bits reinforced with diamond-carbide plates on the efficiency of drilling rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 2, pp. 85 – 90. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.12.

27. Teplyakova A. V., Azimov A. M., Alieva L., Zhukov I. A. Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: Review and analysis of engineering solutions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 9, pp. 120 – 132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_120.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Корнеев Виктор Александрович — канд. техн. наук,
доцент, Сибирский государственный
индустриальный университет,
e-mail: korneev_va@list.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9135-4418.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

V.A. Korneyev, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, 654007, Russia,
e-mail: korneev_va@list.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9135-4418.

Corresponding author: I.O. Familia, e-mail:

Получена редакцией 06.07.2023; получена после рецензии 25.09.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 06.07.2023; received after the review 25.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.

