

Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Научная статья

УДК 622

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/17-29>

Б.Р. Белан, А.Ю. Чебан, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров

БЕЛАН БОГДАН РОМАНОВИЧ – аспирант, aсе.97@mail.ru

ЖИЛИН СЕРГЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник,
sergeyzhilin1@rambler.ru

КОМАРОВ ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ – к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник,
olegnikolaevitsch@rambler.ru

Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН

Комсомольск-на-Амуре, Россия

ЧЕБАН АНТОН ЮРЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, chebanay@mail.ru

Лаборатория геотехнологии и горной теплофизики

Институт горного дела ДВО РАН

Хабаровск, Россия

Современные инструменты безвзрывной выемки тонких рудных жил и методы повышения эффективности бурового вооружения

Аннотация: Показаны современные способы ведения безвзрывной (механической) добычи твердых полезных ископаемых и основные виды бурового вооружения для ведения механической добычи и выемки горной породы. Рассмотрены перспективы улучшения буровых установок и карьерных комбайнов, а также упомянута возможность применения автоматизированной техники при добыче полезных ископаемых. Анализом методов повышения энерго- и ресурсоэффективности бурового вооружения выявлена проблема малой эффективности и высокой стоимости различных процессов армирования. Определен и проанализирован перспективный метод армирования бурового вооружения.

Ключевые слова: безвзрывная добыча, анализ технологий, буровое вооружение, армирование бурового инструмента, металлургия, алюминотермия

Для цитирования: Белан Б.Р., Чебан А.Ю., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Современные инструменты без-взрывной выемки тонких рудных жил и методы повышения эффективности бурового вооружения // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 1(50). С. 17–29. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/17-29>

Введение

Скальные породы обладают значительным запасом прочности – от $f = 5$ до $f = 20$ (по шкале проф. М.М. Протодяконова) [15], вследствие чего их добыча весьма затруднительна. Разрушение пород с помощью энергии взрыва – универсальный и самый эффективный способ подготовки скальных пород к выемке. Универсальность данного метода заключается в том, что с помощью энергии взрыва можно разрушить породу любой прочности и крепости, а эффективность этого процесса – в том, что с его помощью можно получить существенно большее количество горной породы, готовой к выемке погрузочной техникой [7].

Вместе с тем проведение взрывных работ сопряжено со значительными экологическими и финансовыми рисками и имеет ряд иных недостатков: высокий уровень потерь и разубоживания полезного ископаемого, особенно при разработке сложноструктурных залежей;

© Белан Б.Р., Чебан А.Ю., Жилин С.Г., Комаров О.Н., 2022

Статья: поступила: 27.09.2021; рецензия: 29.12.2021; финансирование: Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН, Институт горного дела ДВО РАН.

большое количество вспомогательных операций; сложность организации производства; высокую стоимость взрывчатого вещества; отрицательное воздействие на окружающую среду. В ряде случаев взрывные работы ухудшают качественные характеристики исходного сырья (алмазы, карбонатные породы и др.) [7].

Согласно федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности [9] перед проведением взрывной отбойки все прочие работы на руднике останавливаются, люди и техника отводятся на безопасное расстояние. В момент взрыва в атмосферу выделяется большое количество продуктов горения и пыли (в радиусе 3–4 км от карьера до 800 т пыли и до 700 м³ газов), что неблагоприятно влияет на экологическую обстановку в районе горной выработки. Особую опасность для атмосферы представляют массовые взрывы. Кроме того, возникает опасность обрушения стенок карьера и существует риск поражения осколками людей и техники во время взрыва. Проведение буровзрывных работ запрещено в сейсмоопасных зонах и вблизи жилых районов [9]. Вследствие этого проблемы, связанные с применением специальных видов взрывчатых веществ, внедрением современных методов и способов взрывания, а также заменой буровзрывной добычи механическим разрушением, имеют высокую актуальность.

Альтернативой буровзрывным работам является безвзрывной (механический) способ добычи полезных ископаемых, осуществляемый методами скалывания, резания и дробления породы. Эти методы позволяют вести непрерывную добычу полезных ископаемых без риска поражения осколками, как, например, в случае с буровзрывными работами, а также наносит меньше ущерба экологии. Кроме того, применение безвзрывного метода позволяет вести добычу тонких рудных жил, добыча которых буровзрывным методом экономически не выгодна.

Одной из задач современной горной науки является разработка передовых инновационных энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования на основе новых методов разрушения и добычи горных пород [11]. В этой связи безвзрывной способ добычи полезных ископаемых признан перспективным методом, что определяет актуальность исследований, проводимых в данной области как в России, так и за рубежом.

На протяжении последних 50 лет в целях расширения области применения механических способов разрушения на более крепких породах ведутся работы по их совершенствованию, разработке новых, альтернативных безвзрывных способов разрушения. Рассматриваются возможности увеличения мощности исполнительных органов горных машин [19, 20], повышения износостойкости рабочего инструмента [3, 4], а также разрабатывается ряд новых конструкторских решений [6, 17, 18].

Цели и задачи исследования

Целью настоящего исследования является анализ современных инструментов безвзрывной выемки тонких рудных жил и методов повышения эффективности бурового вооружения.

Исходя из поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- анализ бурового оборудования, применяемого в отечественной и зарубежной практике для безвзрывной добычи полезных ископаемых;
- анализ эффективности инструмента, применяемого на безвзрывном горнодобывающем оборудовании;
- анализ методов повышения энерго- и ресурсоэффективности способов безвзрывной добычи.

Материалы и методы исследования

В настоящее время рынок оборудования для добычи горных пород представлен широким спектром станков и бурового вооружения, согласно чему буровые установки классифицируются по ряду признаков.

По виду работ: для эксплуатационных работ, для разведочных работ, для технических скважин.

По способу бурения делятся на установки: вращательного бурения, вращательно-ударного бурения, ударного бурения, ударно-вращательного бурения, вибрационного бурения, огнеструйного бурения, разрядно-импульсного бурения.

По типу привода различают буровые установки: электрические, электрогидравлические, дизельэлектрические, дизельные.

По технике передвижения: самоходные, передвижные, стационарные буровые установки.

По вариантам дислокации: наземные и морские.

Буровые станки предназначены для вращательного бурения вертикальных и наклонных скважин при разработке месторождений открытым способом [7, 10]. Буровые установки и станки, как правило, используют буровые долота двух основных видов – шарошечные и лопастные. Могут применяться и буровые коронки для колонкового бурения. В свою очередь, каждый вид долот подразделяется на типы, предназначенные для разбуривания горных пород с определенными механическими свойствами в конкретных геологотехнических условиях.

Долота со стальными фрезерованными зубьями используются в основном для бурения неабразивных горных пород различной категории твердости, в то время как долота с твердосплавными зубьями (штырями) применяются для бурения абразивных горных пород разной категории твердости.

Алмазные долота с однослойным вооружением из природных или синтетических алмазов применяются для разбуривания неабразивных средне-твердых и твердых пород. Для разрушения твердых, крепких и очень крепких пород, в том числе абразивных, применяются импрегнированные алмазные долота.

Долота PDC используются главным образом при бурении в неабразивных мягких, средних и средне-твердых породах.

Скорость выполнения бурения – затраты энергии на выполнение процесса за метр проходки – напрямую зависят от правильности подбора бурового инструмента. Также важно, из какого материала высококачественный инструмент, его свойства. Выбор оборудования для бурения зависит от свойства породы и места, где будут вестись работы.

Преимущественный материал для изготовления буровых долот – сталь с хромом, никелем, молибденом. Кроме того, производители наносят на бурильное основание специальный твердый сплав типа ВК-6, ВК-8, что придает ему дополнительную прочность. В настоящее время до 90% всех буровых работ как в России, так и за рубежом выполняется с помощью шарошечных долот. Такое долото разрушает породы дробяще-скалывающим методом, используемым в технологии вращательного бурения.

Лопастные долота применяются в основном для того, чтобы в короткое время разбуривать мягкие и средние по твердости породы. Благодаря высокой скорости проходки в рыхлых и мягких породах за проход (а это полное время работы долота в скважине) бурят скважины глубиной от сотен метров до нескольких километров. Такие долота имеют более простую конструкцию, чем шарошечные, и меньшую себестоимость изготовления. Однако режущие элементы долот постоянно находятся в контакте с породой, и такие долота изнашиваются намного быстрее шарошечных. В основном используются лопастные долота Ø76–445 мм пяти видов: однолопастные пикообразные (рис.1), двухлопастные, трехлопастные, трехлопастные истирающе-режущие, а также шестилопастные.

Как видно из рис.1, лопасти долота 1 постоянно контактируют с породой 4 во время бурения. Армированные пластины 3, в свою очередь, подвержены истиранию и температурному воздействию. Для охлаждения долота и очистки забоя из бурильной колонны через отверстие в корпусе долота подается жидкость со скоростью не менее 80 м/с. Средняя глубина одной проходки составляет 1,5 км. Для продления срока службы инструмента используется армирование не только самой лопасти, но и её контактного края. Это позволяет понизить разрушающее воздействие пород, а также способствует образованию более гладких и ровных стенок скважин.

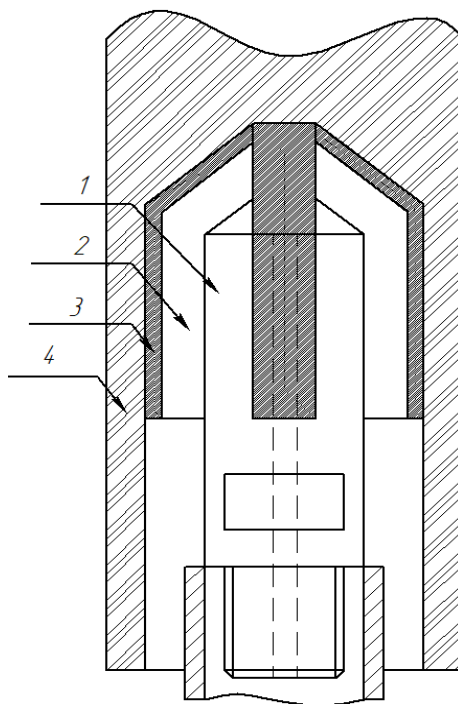


Рис. 1. Схема лопастного бурового долота:
1 – корпус долота; 2 – лопасть; 3 – армированные пластины; 4 – буримая порода

Алмазное (секторное) долото применяется для разрушения неабразивных пород средней и высокой твердости. Рабочим органом этого инструмента является основание с поликристаллическими композитными вставками. Если используется стальное основание, то поликристаллические алмазы монтируются в основание с помощью пайки, если же основанием является порошковая матрица, то алмазы внедряются в материал матрицы по специальной технологии.

У алмазных долот много положительных эксплуатационных качеств:

- они формируют при бурении геометрически круглый ствол скважины в отличие от ствола треугольной формы со скругленными вершинами, получаемого после бурения шарошечными долотами;
- поверхность стенок ствола при «алмазном» бурении получается очень гладкой;
- алмазные долота отличаются износостойкостью;
- отсутствие в конструкции подвижных частей увеличивает надежность алмазного инструмента.

Но есть и отрицательные качества:

- высокая цена алмазного долота;
- неспособность работать с абразивными породами, а значит, довольно ограниченная область применения;
- необходимость специальной подготовки ствола скважины перед бурением алмазным долотом, в частности предварительной проходки шарошечным долотом, что не всегда удобно;
- утрата абразивных свойств и быстрая изнашиваемость алмазной напайки при высоких температурах бурения.

Буровые коронки для колонкового бурения используются при буровых работах в породах мягкой или средней твердости (с I по VIII, а также частично IX категории). Бурение с использованием таких коронок производится колонковым вращательным или вращательно-ударным способом. Конструктивно инструмент представляет собой цилиндр, один из концов которого имеет резьбу для фиксации на колонковой трубе, а другой оснащен твердосплавными пластинами. На наружной поверхности корпуса **коронка твердосплавная** имеет фрезерованные **шламовые пазы**, которые помогают свободно проходить разрушенную породу. На ее

внутренней поверхности (в том месте, где она соединяется с колонковой трубой) имеется конусная поверхность, предназначенная для захода керновательного кольца. Между резцами на торце корпуса вырезают пазы, которые служат для свободного прохода промывочной жидкости (рис. 2).

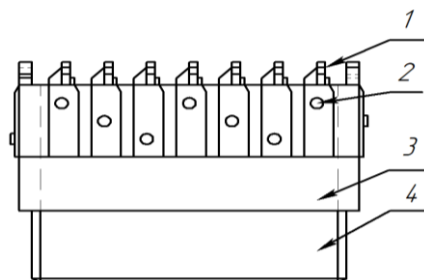


Рис. 2. Схема буровой коронки для колонкового бурения:
1 – резцы коронки; 2 – калибрующие резцы; 3 – торцевая часть коронки;
4 – присоединительная резьба

Вид торца, где расположены твердосплавные пластины, а также форма самих пластин зависят от области применения инструмента. В зависимости от расположения твердосплавные пластины имеют разное название и назначение. Расположенные на торце корпуса пластины *основные*, а те, что находятся на наружных и внутренних стенках корпуса – *подрезные*. Кроме того, в промывочных каналах некоторых коронок имеются дополнительные подрезные пластины. Они не только разрушают породы забоя, но и служат для калибровки стенок формируемой скважины.

Корпус твердосплавных коронок изготавливается из стали марок 30, 35 или 40 по ГОСТ 1050-2013 или Ст45 по ГОСТ 14637-89.

Преимущества твердосплавных буровых коронок [2]:

- низкая стоимость;
- хорошие показатели по скорости бурения и выходу керна;
- возможность применять высокочастотные гидроударные машины;
- получение скважин большого диаметра (до 172 мм).

Стоит отметить технологию безвзрывной разработки карьеров с помощью карьерного комбайна. Предназначение карьерных комбайнов заключается в ведении открытой разработки сложноструктурных горизонтальных и слабонаклонных залежей (бокситовых и железных руд, гипса, мергеля и др.) при относительно небольших мощностях отдельных пластов полезных ископаемых. По расположению рабочего органа различают комбайны:

- с передним фрезерным рабочим органом;
- с центральным расположением на раме рабочего органа шнекового типа;
- с передним консольным расположением широкозахватного рабочего органа (используется при относительно больших объёмах добычи).

Преимущества карьерных комбайнов при разработке карьеров:

- высокая производительность – 300–450 т/ч;
- маневренность, обеспечивающая его разворот (на месте) на 180° за 1,5 мин;
- возможность постоянного поддержания в ровном состоянии автодорог и рабочих площадок в карьере, что снижает износ шин автотранспорта;
- обеспечение надёжного дренажа рабочей зоны карьера;
- способность формировать крутые и устойчивые откосы уступов и бортов карьера в течение всего периода отработки месторождений;
- снижение затрат на буровзрывные работы и дробление сырья;
- повышение промышленной и экологической безопасности.

В России с 2006 г. применяется безвзрывная тонкослойная технология добычи известняков с использованием трёх видов карьерных стреловых комбайнов с центральным расположением на раме рабочего органа [1]. Использование карьерных комбайнов и экскаваторов

перспективно и для открытой разработки россыпных месторождений алмазов, вольфрама, золота и олова в северо-восточных регионах России. Недостатком стреловых комбайнов и карьерных экскаваторов является необходимость остановки выемочных машин при замене автосамосвалов под погрузкой как в случае заполнения кузова, так и по причине перехода выемочной машины к отработке другого типа горных пород, что снижает производительность ведения работ.

Также на геологических работах могут применяться баровые установки, используемые при земляных работах для прорезания в грунте траншей или щелей. Рабочий орган баровой машины размещается в вертикальной плоскости, а сама машина перемещается в горизонтальной.

Общие достоинства баровых исполнительных органов:

- погрузочная способность;
- простая конструкция;
- высокая производительность;
- легкость эксплуатации;
- работа в любых климатических условиях.

Недостатками являются:

- невысокая долговечность цепи;
- большие затраты мощности;
- чрезмерный шум во время работы.

Основной их недостаток – принцип создания напорного усилия, который базируется на контакте двух сред (воздушной и геосреды), что требует увеличения массово-габаритных характеристик машины.

Для доработки запасов полезных ископаемых, содержащихся в маломощных пластах, применяют шнекобуровые агрегаты и комплексы глубокой разработки [17]. Недостатками этого оборудования являются: большое поперечное сечение выработок; наличие жесткой связи в виде транспортера или стрелы для передачи напорного усилия к исполнительному органу, что ведет к необходимости создания оборудования значительной массы и габаритов.

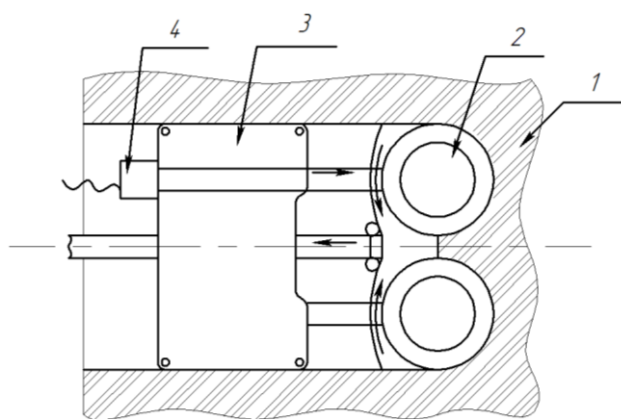


Рис. 3. Схема автономного выемочного агрегата (геохода):

**1 – добываемая порода; 2 – двойная дисковая фреза; 3 – защитный корпус;
4 – блок управления**

Эти недостатки позволяет исключить автономный выемочный агрегат (рис. 3), который способен вести разработку тонких рудных жил с минимальным разубоживанием. Такой агрегат является функциональным и мобильным оборудованием, обеспечивающим возможность отработки рудных жил с различными углами падения как при ведении открытых работ, так и в подземных горных выработках. Компонировка исполнительного органа выемочного агрегата дает возможность получать выработки прямоугольного сечения, что обеспечивает высокий коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр, а фиксация корпуса агрегата обеспечивается распорными гидроцилиндрами [17]. Существенный недостаток данного агрегата – быстрое истирание дисковых фрез вследствие их сильного нагрева.

В последнее время в геологии все большее признание получает роботизированная техника. Основная причина, по которой применение автоматизированной техники является перспективным направлением развития в горнодобывающей отрасли, это увеличение доли разведанных месторождений, которые находятся в сложных горнотехнологических условиях. Ввиду этого увеличиваются срок и стоимость подготовки квалифицированных специалистов, а также производства и доставки соответствующей техники и оборудования. Не стоит забывать и о быстром расходе человеческого ресурса. Поэтому главными инструментами повышения производительности труда являются роботы, поскольку они выполняют широкий спектр ручных задач более эффективно и последовательно, чем люди. Горнодобывающая промышленность имеет большой потенциал для автоматизации, с применением которой появляется возможность оптимизации, поскольку становится доступным больший объем информации, а действия могут многократно повторяться с высокой точностью [8].

Важнейшим достоинством роботизированных систем является повышение уровня безопасности ведения горных работ. Широкое применение роботизированной техники на открытых и подземных горных работах позволяет усовершенствовать проектирование карьеров, шахт и правила безопасности, а также способствовать разработке новых видов горных машин и оборудования, что обеспечит значительное повышение эффективности добычи полезных ископаемых [16].

Автоматизация горной промышленности активно проводится с 2006 г. по нескольким направлениям – от добывающего оборудования до технологического транспорта и других технических средств. Использование автономных самосвалов, поездов, буровых установок позволяет увеличить эффективность добычи полезных ископаемых и снизить нехватку рабочих кадров [16]. Эффективное использование буровых установок, будь то роботизированные или традиционные, невозможно без наличия современного бурового вооружения. С этой целью в металлургии внедряют различные способы повышения эксплуатационных характеристик.

В течение XX в. технология производства шарошечных буровых долот претерпела значительные изменения, заметно усложнился и процесс их изготовления; при этом эффективность и надежность данного вида бурильного инструмента увеличились в разы. Среди многообразия шарошечного бурильного инструмента особое место занимают долота со стальным армированным зубчатым вооружением.

Сегодня распространенным способом формирования зубчатого вооружения является фрезерование зубьев. Процесс фрезерования позволяет создавать вооружение сложной конфигурации с максимально возможным вылетом и высокой разрушающей способностью. Однако это весьма металлоемкие процессы, так как при фрезеровании значительная часть металла заготовки идет в стружку. Данная технология предусматривает использование широкой номенклатуры металлорежущего инструмента, которая значительно ограничивает создание зубчатого вооружения сложной геометрии. Это наиболее важно для бурильного инструмента больших размеров и предназначенного для бурения средней твердости и особенно мягких пород, где зубья вооружения имеют максимальный вылет, а геометрия вооружения образует сложную геометрическую структуру [12]. Другим серьезным недостатком процесса фрезерования является ослабление формы зубьев (разрушение текстуры металла, надрезы на обработанной поверхности), которые создают остаточные напряжения и при циклических нагрузках являются очагами возникновения микротрещин, что вызывает в дальнейшем разрушение долота [12].

По данным заводов-изготовителей буровых долот, трудоемкость фрезерования может составлять до 25% от общей трудоемкости изготовления шарошек, а коэффициент использования металла при изготовлении таких шарошек находится в диапазоне 0,35...0,40 [12]. Исходя из этого при производстве шарошечных долот диаметром более 300 мм способ образования вооружения путем штамповки с последующим фрезерованием становится наиболее затратным. Поэтому при изготовлении долот больших диаметров применяется технология литья шарошек по выплавляемым моделям [12]. Однако физико-механические характеристики стационарно литого металла значительно ниже, чем у ковального. Это существенный недостаток литых шарошек,

который не позволяет обеспечивать требуемую прочность и твердость металла на внутренних поверхностях шарошек, что, в свою очередь, существенно снижает работоспособность опорных узлов долота.

Для производства долота используют низкоуглеродистые стали. Эксплуатируются они в тяжелых условиях ударно-усталостного и абразивного износа. Вследствие этого технологический процесс изготовления шарошек бурильного инструмента включает в себя операцию поверхностного упрочения материала: химико-термическую обработку с последующим армированием рабочих поверхностей зубьев вооружения твердым сплавом.

Основной целью процесса армирования является придание рабочим поверхностям вооружения бóльшей твердости и износостойкости. В настоящее время для упрочения поверхностей зуба вооружения, а также тыльного конуса шарошки применяется поверхностное армирование твердым сплавом. Технология поверхностного армирования заключается в нагреве поверхности армирования до стадии оплавления и нанесения на нее зерен твердого сплава. Зерна под действием собственного веса погружаются в расплавленный металл и при его кристаллизации закрепляются в нем.

В отечественном и зарубежном производстве для армирования зубьев шарошек используется литой карбид вольфрама – WC релит, стали ВК6В, ВК8В (см. таблицу). Однако, несмотря на свои преимущества (высокая твердость и износостойкость), он обладает рядом недостатков: неоднородность формы, низкий коэффициент заполнения зернами карбида вольфрама и т.п. (ГОСТ 3882-74).

Химический состав и механические характеристики стали ВК8В

WC, %	Co, %	Предел прочности при изгибе, Н/мм ²	Плотность, г/см ³	Твёрдость, HRA
92	до 8	1813	14,4–14,8	не менее 86,5

Помимо низкоуглеродистых специальных сталей в производстве применяют метод армирования резцов долота. Технология поверхностного армирования заключается в нагреве поверхности армирования до стадии оплавления и нанесении на нее зерен твердого сплава.

Известны различные технологические процессы поверхностного армирования, различающиеся в основном способами нагрева армируемой поверхности. Это нагрев токами высокой частоты, ацетиленокислородным, атомно-водородным и аргоно-дуговым пламенем, электрической дугой, плазмой и др. Перед армированием проводится предварительный подогрев первых зубьев шарошки до темно-красного цвета, после чего определенная часть армирующего компонента с помощью дозирующего приспособления насыпается на поверхность зуба равномерным слоем.

В последнее время в зарубежной практике широко используется технология порошковой наплавки твердого сплава на рабочие поверхности зубьев вооружения бурильного инструмента. Эта технология сочетает в себе элементы порошковой металлургии и традиционнойковки и позволяет создавать шарошки с поверхностно-армированным зубчатым вооружением, с высокими физико-механическими характеристиками как стальной основы, так и армированного слоя, тем самым обеспечивая высокую точность геометрических параметров вооружения.

Известны и другие технологии изготовления зубчатого вооружения: горячее накатывание зубьев, штамповка с полным профилем зубьев, прессование под высоким давлением расплавленного металла, безоблойная штамповка и др. Однако данные процессы весьма сложны, трудоемки и требуют специального оборудования, что сдерживает их внедрение в промышленность.

По сравнению с вышеуказанными процессами ряд преимуществ имеет способ центробежного литья шарошек [13]. В отличие от стационарного литья центробежное, как один из специальных способов литья, повышает геометрическую точность отливки, чистоту ее поверхности, значительно улучшает отвод газов и процесс кристаллизации стали. Находясь в

поле центробежных сил, металл уплотняется, повышается его ударная вязкость, и он приобретает физико-механические характеристики на уровне кованого. При центробежном литье металл, особенно в периферийной части отливки, очищается от шлаков и разного рода включений, которые удаляются на свободную поверхность отливки. В данном процессе питание расплавленной сталью внутри формовочного пространства при отливке происходит за счет центробежных сил, причем оно значительно интенсивнее, чем при статической отливке. Поэтому при центробежном литье не нужна ни литейная прибыль, ни литниковая система, а это значительно экономит металл. Однако при центробежном литье шлаки и разного рода включения концентрируются в центральной части отливки, значительно снижая качество металла, но именно в этом месте в дальнейшем формируются рабочие поверхности внешнего кольца подшипникового узла. В целях устранения этого недостатка было предложено совместно с отливкой в шарошку вплавливать опорный стакан (рис. 4).

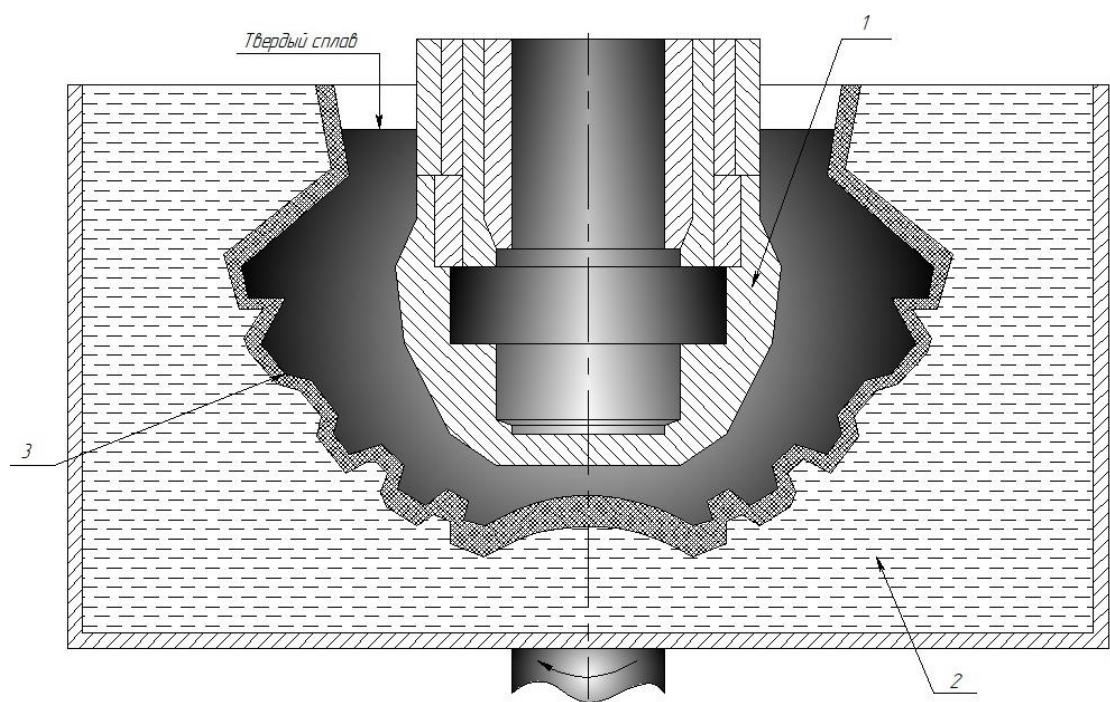


Рис. 4. Схема центробежного армирования шарошек буровых долот:
1 – выплавляемый стакан; 2 – литейная форма; 3 – формовочная опока

Также одним из способов армирования является применение армированной напайки, выполненной методом алюминотермии. Это способ получения металлов, неметаллов, а также сплавов путем восстановления их оксидов металлическим алюминием. Алюминотермическая реакция сопровождается выделением большого количества тепла, а температура самой смеси может достигать 3000°C. Такая реакция объясняется тем, что из нескольких возможных химических реакций идёт та реакция, при которой выделяется наибольшее количество теплоты. При окислении алюминия кислородом в Al_2O_3 выделяется до 30 кДж/моль энергии, что превосходит теплоту сгорания (окисления) других металлов.

В настоящее время получение алюминидов Fe–Al осуществляется благодаря использованию изостатического прессования и спекания в вакууме, электрошлакового переплава, дугового плазменного распыления и т.п., которые являются технологически сложными и довольно дорогостоящими. Применение алюминотермического восстановления оксидов металлов с помощью самораспространяемого высокотемпературного синтеза (СВС) позволяет получить отливку из термитной стали. Несмотря на преимущества применения интерметаллидов Fe–Al в производстве, эти соединения отличаются высокой хрупкостью. Всем интерметаллидам системы Fe–Al присущ хрупкий характер разрушения со значениями прочности при испытании на изгиб, превышающими 1000 Мпа.

В зависимости от содержания Al в интерметаллидах формируются определенные соединения алюминидов железа. Технологически предпочтительной является структура типа Fe_3Al , обладающая упорядоченностью и отличающаяся высокой жаростойкостью, в частности в химически активных средах. На практике для достижения требуемых физико-механических и эксплуатационных свойств интерметаллидных сплавов системы Fe–Al осуществляют корректировку введением в их состав ряда элементов: хрома, никеля, меди, ниобия, углерода, молибдена, вольфрама и др. Так, добавление в определённых пропорциях Cu в состав шихты системы Fe_3Al позволяет уменьшить размер зёрен и увеличить предел текучести сплава более чем в два раза [5]. Вследствие этого можно сделать предположение, что при нужных пропорциях метод алюминотермии позволит создать армирующую наплавку для бурового инструмента, по техническим характеристикам приближённую, а возможно и превосходящую, применяемые сплавы для изготовления буровых фрез, таких как BK6B, BK8B и др. [14].

Подведение итогов и заключение

Анализ бурового оборудования показал, что в последнее время многими производителями твердосплавного вооружения в нашей стране и за рубежом разработано множество вариантов исполнения геометрии твердосплавного зубчатого вооружения, в полной мере отвечающей различным способам и условиям бурения шарошечным буровым инструментом. Широко применение получили новые формы твердосплавных зубков, предназначенных для оснащения породоразрушающего инструмента, используемого при бурении мягких и средних абразивных пород.

Проведенный в статье анализ технологий изготовления стального армированного вооружения шарошечных буровых долот и коронок показал, что существующие сегодня технологии достаточно трудоемки, дорогостоящи и не всегда обеспечивают требуемое качество вооружения, необходимое для тех или иных условий бурения. К сожалению, несмотря на многолетний опыт применения технологии поверхностного армирования и постоянное ее совершенствование, поверхностный слой долот, армированный твердым сплавом, получается хрупким, неоднородным, вследствие чего при значительных знакопеременных ударных нагрузках в нем зарождаются микротрещины, что в дальнейшем приводит к его интенсивному выкрошиванию.

Рассмотренные здесь методы наплавки очень трудоемкие. Ручные операции плохо поддаются автоматизации. В частности, для шарошек наплавлять армированный слой необходимо от одной поверхности зуба, например набегающей, до всех пяти поверхностей – двух боковых, двух торцовых, а также поверхности притупления зуба. При шарошечном бурении постепенно скалывающийся армированный слой обнажает мягкую сердцевину зуба, после чего происходит интенсивное абразивное изнашивание основного металла. Зуб шарошки принимает округлую форму и притупляется, что ведет к резкому снижению удельного давления на забой при бурении.

К недостаткам армирования относится и малая твердость армирования рабочей поверхности (52–54 HRC), так как в составе сплава присутствуют мягкие металлы, такие как кобальт, никель и др.

В качестве альтернативного метода армирования предлагается применение наплавки, выполненной методом алюминотермии. Одним из главных преимуществ данного метода является его экономичность. Цена одного бурового армированного инструмента может составлять от 10 тыс. до 3,5 млн руб., в зависимости от диаметра, вида инструмента и используемых материалов. Для получения термитной стали, выполненной методом алюминотермии, можно применять металлические производственные отходы, которые в больших количествах присутствуют на металлургических предприятиях. Стоимость металлических отходов составляет, в зависимости от предприятия, 20–40 тыс. руб. за тонну. Данным методом можно получить сталь с такими же (или приближенными к ним) характеристиками, что и у серийного бурового инструмента марки стали BK6B, BK8B и др. Это позволит значительно удешевить процесс производства, так как там не будут применяться дорогостоящие армирующие материалы, в частности алмазное напыление.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Губенко А.А., Ле. Б.З., Грабский А.А., Петров И.В. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов для безвзрывной послойной выемки прочных пород // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2010. № 7. С. 24–30.
2. Гулидов О.Е. Современный твердосплавный буровой инструмент // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: мат. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и ученых, посвященной 35-летию филиала ТИУ в г. Нижневартовске, Нижневартовск, 28 апреля 2016 г. Тюмень: ТИУ, 2016. С. 77–81.
3. Еремин Е.Н., Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Камысов С.С. Сверхтвердые антифрикционные покрытия для буровых коронок и долот // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: мат. 6-й междунар. науч.-техн. конф., Омск, 25–30 апреля 2016 г. Омск: Омский гос. тех. ун-т, 2016. С. 158–159.
4. Исакова А.Р., Березин Н.А., Рышков Д.Е., Шапочка К.М. Основные свойства эльбора // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых: сб. науч. ст. 3-й Междунар. молодежной науч. конф. Курск, 13–15 ноября 2014. Курск: Университетская книга, 2014. С. 333–336.
5. Комаров. О.Н., Жилин С.Г., Предеин В.В., Попов А.В. Механизмы формирования железосодержащих интерметаллидов, получаемых алюминотермией, и влияние на их свойства методов специальной обработки // Металлург. 2020. № 8. С. 90–102.
6. Лабутин В.Н., Ческидов В.И., Зайцев Г.Д. Опыт и перспективы применения на открытых горных работах безвзрывных технологий разработки массивов горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2014. Т. 1, № 1. С. 182–190.
7. Левинсон С.Я., Ланцевич М.А., Гендлина Л.И., Акишев А.Н. Новая технология и оборудование для безвзрывного формирования рабочей зоны глубоких картеров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 5. С. 125–132.
8. Макаев Р.Р. Автоматизация процессов бурения // Инновационные процессы в науке и технике XXI века: мат. XIV Всерос. науч.-практ. конф., 22 апреля 2016, Нижневартовск. Тюмень: ТИУ, 2016. С. 416–420.
9. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.12.2020 № 494 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения"» URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012280020> (дата обращения: 23.01.2022).
10. Подэрин Р.Ю., Замышляев В.Ф., Прасолов С.К. Современное состояние конструкций карьерных буровых станков // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2012. № 12. С. 100–113.
11. Ржевский В.В., Трубецкой К.Н. Задачи горной науки в области открытой разработки месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. 1988. № 1. С. 21–23.
12. Сериков Д.Ю. Анализ технологий изготовления стального армированного вооружения шарошечных буровых долот // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2017. № 4. С. 8–14.
13. Сериков Д.Ю. Повышение качества центробежно-объемно-армированного ассиметричного косозубого вооружения шарошечного бурового инструмента // Территория НЕФТЕГАЗ. 2015. № 9. С. 20–26.
14. Справочник металлиста / под ред. А.Г. Рахштадта, В.А. Брострена. Москва: Машиностроение, 1976. Т. 2. 558 с.
15. Танайно А.С. О классификации полускальных и скальных горных пород по показателям прочности // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2008. № 2. С. 7–13.
16. Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18, № 1. С. 4–15.
17. Чебан А.Ю. Технология доработки рудных тел добычной установкой, оборудованной автономным выемочным модулем // Маркшейдерия и недропользование. 2019. № 4. С. 22–28.
18. Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15, № 3. С. 18–23.
19. Chen P., Fang T., Zhou Z., Wang J., Yuan X. A novel 8000m rig and its application for ultra-deep well drilling in submountain region. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and

- Exhibition 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates 29-31 January 2018. 2018;1:756-769. DOI: 10.2118/189417-MS
20. Dong F., Hongliang T., Ruize W. Development and Application of Lightweight Coring Drilling Rig in Tunnel. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2020;5:052005. DOI: 10.1088/1755-1315/446/5/052005

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 1/50

Dynamics, Durability of Machines, Instruments and Equipment

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/17-29>

Belan B., Cheban A., Zhilin S., Komarov O.

BOGDAN R. BELAN, Postgraduate Student, ace.97@mail.ru

SERGEY G. ZHILIN, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, sergeyzhilin1@rambler.ru

OLEG N. KOMAROV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, olegnikolaevitsch@rambler.ru

Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS

Komsomolsk-on-Amur, Russia

ANTON Yu. CHEBAN, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, chebanay@mail.ru

Laboratory of Geotechnology and Mining Thermophysics

Mining Institute of the FEB RAS

Khabarovsk, Russia

Up-to-date tools for non-explosive mining of thin ore veins and methods for improving the efficiency of drilling equipment

Abstract: Up-to-date methods of non-explosive (mechanical) mining of solid minerals are considered. The results of a comparative analysis of the main types of drilling equipment for mechanical mining and rock excavation are presented, their advantages and disadvantages are determined. The prospects for improving drilling rigs and surface miners are considered; the possibility of using the automated equipment in the extraction of minerals is discussed. The analysis of methods for increasing the energy and resource efficiency of drilling equipment revealed the problem of low efficiency and high cost of various reinforcement processes. A promising method for reinforcing drilling equipment has been identified and analyzed.

Keywords: non-explosive production, analysis of technologies, drilling equipment, reinforcement of drilling tools, metallurgy, aluminothermy

For citation: Belan B., Cheban A., Zhilin S., Komarov O. Up-to-date tools for non-explosive mining of thin ore veins and methods for improving the efficiency of drilling equipment. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2022;(50):17-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/17-29>

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

1. Gubenko A.A., Le B.Z., Grabskih A.A., Petrov I.V. The current state and prospects for the development of designs of open-pit miners for non-explosive layer-by-layer excavation of strong rocks. Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University. 2010;(7):24-30.
2. Gulidov O.E. Modern carbide drilling tools. Experience, current problems and development prospects of the oil and gas complex: Proc. All-Russ. Sci. Conf., Nizhnevartovsk, April 28, 2016. Tyumen, Industrial University of Tyumen, 2016. 77-81 p.
3. Eremin E.N., Yurov V.M., Laurina V.Ch., Guchenko S.A., Kamisov S.S. Superhard antifriction coatings for drill bits and bits. Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production:

- Proc. of 6th Int. Sci. Conf., Omsk, April, 25-30, 2016. Omsk, Omsk State Technical University, 2016. 158-159 p.
4. Isakova A.R., Berezin N.A., Rishkov D.E., Shapochka K.M. The main properties of Elbor. Proc. of Int. Sci. Conf. Kursk, November, 13–15, 2014. Kursk, University book, 2014. 333-336 p.
5. Komarov O.N., Zhilin S.G., Predein V.V., Popov A.V. Mechanisms of the formation of iron-containing intermetallic compounds obtained by aluminothermy and the effect of special treatment methods on their properties. *Metallurgist*. 2020;(8):90-102.
6. Labutin V.N., Cheskidov V.I., Zajcev G.D. Experience and prospects of using non-explosive technologies for the development of rock mass in open pit mining. *Fundamental and applied issues of mining sciences*. 2014;1(1):182-190.
7. Levenson S.Y., Lantsevich M.A., Gendlina L.I., Akishev A.N. New technology and equipment for non-explosive formation of free face in deep open pit mines. *J. of Mining Science*. 2016;52(5):943-948.
8. Makaev R.R. Automation of the drilling process. Innovative processes in science and technology of the XXI century: Proc. of 14th All-Russ. Sci. Conf., Nizhnevartovsk, April 22, 2016. Tyumen, Industrial University of Tyumen, 2016. 416-420 p.
9. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor) Order No. 494 dated 03.12.2020 "On approval of Federal norms and regulations in the field of industrial safety 'Safety rules at production, storage and use of blasting agents of industrial application' ". URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012280020> – 23.01.2022.
10. Poderin R.Y., Zamishlaev V.F., Prasolov S.K. Open pits drill rigs modern design. *Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University*. 2012;(12):100-113.
11. Rjevski V.V., Trubetskoi K.N. Tasks of mining science in the field of opencast mining of mineral deposits. *Gornyi J*. 1988;(1):21-23.
12. Serikov D.Y. Analysis of manufacturing technologies for steel reinforced armament of roller-cutting drill bits. *Construction of Oil and Gas Wells Onshore and Offshore*. 2017;(4):8-14.
13. Serikov D.Y. Improving the quality of the centrifugally-volumetric-reinforced asymmetric helical cutting structure of the roller cone drilling tool. *Territory NEFTEGAZ*. 2015;(9):20-26.
14. Directory of a metal worker / Ed. A.G. Rakhshadt, V.A. Brostren. Moscow, Mechanical engineering, 1976. Vol. 2. 558 p.
15. Tanajno A.S. On the classification of semi-rocky and rocky rocks in terms of strength. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 2008;(2):7-13.
16. Hazin M.L. Robotic technology for the extraction of minerals. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova*. 2020;18(1):4-15.
17. Cheban A.Y. Technology of ore bodies processing by a mining installation equipped with an autonomous mining module. *Mine survey and subsoil use*. 2019;(4):22-24.
18. Cheban A.Y. Method and equipment for opencast mining of small-scale steeply dipping deposits. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University G.I. Nosov*. 2017;15(3):18-23.
19. Chen P., Fang T., Zhou Z., Wang J., Yuan X. A novel 8000m rig and its application for ultra-deep well drilling in submountain region. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates 29-31 January 2018*. 2018;1:756-769. DOI: 10.2118/189417-MS
20. Dong F., Hongliang T., Ruize W. Development and Application of Lightweight Coring Drilling Rig in Tunnel. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2020;5:052005. DOI: 10.1088/1755-1315/446/5/052005