

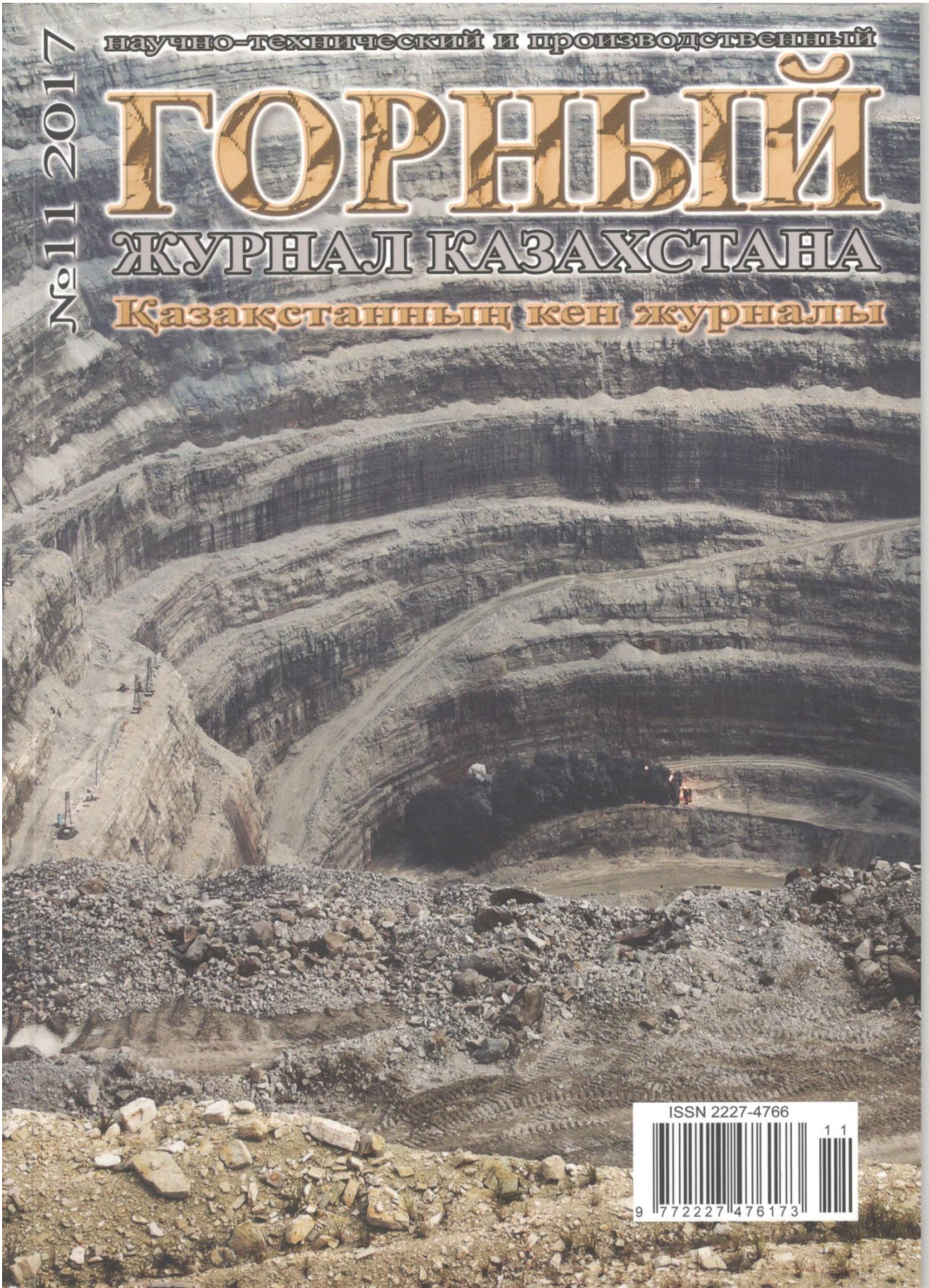
№11 2017

научно-технический и производственный

# ГОРНЫЙ

ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА

Қазақстанның кен журналы



ISSN 2227-4766



9 772227 476173

1 1



® – статья на правах рекламы  
 ⓘ – информационное сообщение  
 ✍ – статья публикуется в авторской редакции

- 3** Колонка редактора  
 Геотехнология
- 4** *Aben Kh.Kh., Krupnik L.A., Shaposhnik Y.N., Aben E.Kh.*  
 Technology of blasting at the contact with backfilled stopes
- 6** *Ермолаева А.*  
 Золотой запас «Казцинк» – Казахстану! ®  
 Геомеханика
- 8** *Нурлыбаев Р.О.*  
 Устройство для изучения физических свойств образца горных пород
- 12** *Лис С.Н., Кубайчук Ю.А.*  
 Пространственные закономерности проявления флюидоактивности угольных пластов  
 Переработка полезных ископаемых
- 19** *Жалгасулы Н., Естемесов З.А., Козут А.В., Сартбаев М.К.*  
 Құрылыс материалдарын шығаруға арналған техногенді шикізаттар  
 Горные машины
- 24** *Мырзахметов Б.А., Токтамисова С.М., Сарыбаев Е.Е.*  
 Энергетические и технико-технологические преимущества реконструкции короткоходных балансирных приводов в длинноходовые
- 31** *Ратов Б.Т., Хоменко В.Л., Байбоз А.Р., Деликешева Д.Н.*  
 Классификация бурового твердосплавного инструмента  
 Геоинформатика
- 40** *Алтаева А.А., Шамганова Л.С., Кашиников Ю.А.*  
 Типы и характеристики современных геоинформационных программ для создания трехмерной геомеханической модели
- Юбилей
- 46** Новые горизонты моногорода (к 90-летию Ачисайского полиметаллического комбината)
- 48** Исахан Жумабаев (к 80-летию со дня рождения)
- 49** Итоги Mining World Central Asia, Kazcomak, Metaltech 2017: более 2000 специалистов ознакомились с технологическими новинками горнорудной отрасли ⓘ
- Памяти
- 51** Евгений Иванович Рогов (1937-2017)
- 52** Требования к оформлению статей



Б.Т. Ратов<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, профессор*, ratov69@mail.ru  
В.Л. Хоменко<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доцент*, trmpivova@yandex.ua  
А.Р. Байбоз<sup>1</sup>, *магистр, PhD докторант*, baiboztegi@gmail.com  
Д.Н. Деликешева<sup>1</sup>, *магистр, PhD докторант*, delikesheva@mail.ru

<sup>1</sup> Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан),

<sup>2</sup> Государственное высшее учебное заведение «Национальной горный университет» (г. Днепр, Украина)

## КЛАССИФИКАЦИЯ БУРОВОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Алғашқы қатты қорытпалар шамамен жүз жыл бұрын пайда болды. Олардың пайда болуы жана болат маркалары мен қорытпаларын өңдеу үшін жетілген материалдарды қажет еткен металл өңдеу өндірістерінің талаптарымен шартталды. Қатты қорытпалар ұңғыларды бұрғылау кезінде тау жыныстарын бұзушы аспаптарды жасау үшін сәтті қолданыла бастады және техникалық-экономикалық көрсеткіштердің айтарлықтай ұлғаюына мүмкіндік берді. Олардың одан арғы дамуына техникадағы екі бағыт мүмкіндік туғызды: металл бұйымдарды дайындаудың жана әдісін – «ұнтақты металлургия» жасау және аса қатты металл тәрізді заттар – карбидтерді алу тәсілдерін жасау. Қатты қорытпалар (900-1150°C) жоғары температура кезінде сақталатын жоғары қаттылыққа, тозуға төзімділік пен беріктілікке ие ерекше класты композициялық материалдан тұратын композиция ретінде анықтауға болады. Көпшілікпен қосылыстардан, әдетте, карбидтен және салыстырмалы тез балқитын байланыстырғыш материалдан тұратын композиция ретінде анықтауға болады.

Первые твердые сплавы появились чуть более ста лет назад. Их внешний вид был обусловлен требованиями металлургической промышленности, которым требовались более совершенные материалы для переработки новых сортов стали и сплавов. Сварные сплавы быстро начали успешно применяться при бурении скважин для производства камерных инструментов и способствовали значительному увеличению технических и экономических показателей. Два прогрессивных направления в технологии способствовали их дальнейшему развитию: созданию нового метода производства чешек – «порошковой металлургии» и разработке методов получения очень твердых металлических веществ – карбидов. Твердые сплавы представляют собой композиционные материалы особого класса, имеющие высокую твердость, износостойкость и прочность, которые сохраняются при высоких температурах (900-1150°C). Если коротко, то они могут быть определены в виде композиции, состоящей из огнеупорного соединения, как пра-вилу, карбида, и связующего материала сравнительно низкой температуры плавления.

*Түйінді сөздер:* тау жынысын бұзушы аспап, қатты қорытпалар, коронка, тістер, шарошка.  
*Ключевые слова:* породоразрушающий инструмент, твердые сплавы, коронка, зубья, шарошка.

В настоящее время твердые сплавы применяются не только в конструкциях инструментов для разрушения горных пород, но и при изготовлении другого самого разнообразного бурового инструмента.

Цель настоящей работы – анализ возможных способов применения твердых сплавов при бурении скважин, а также классификация бурового твердосплавного инструмента, который можно разделить на *технологический*, с помощью которого непосредственно происходит углубление скважин (породоразрушающий инструмент, колонковый набор, бурильная колонна и ее элементы); *вспомогательный* – для повышения эффективности бурения путем гашения вибраций и ударов (демпферы, амортизаторы, виброгасители) и проведения спуско-подъемных операций (ключи, элеваторы, трубодержатели, а также сами обсадные трубы и их соединения); *аварийный* – для предотвращения (шламоуловители, противоприхватные переходники и т. д.) и ликвидации аварий (ловильный инструмент, фрезеры и т. д.); *специальный* – для проведения

специальных работ в скважинах (например, при искусственном искривлении забоя, при проведении тампонирувания).

На основании анализа материалов, применяемых в конструкциях различного бурового инструмента, авторами предлагается классификация бурового инструмента, содержащего твердые сплавы (рис. 1).

Наиболее широкое применение твердые сплавы находят при изготовлении различного породоразрушающего инструмента, такого как долота, бурильные головки, коронки, расширители и другие. Твердые сплавы применяются как в системе вооружения долот, так и в системах промывки и опоры. В системе вооружения они могут использоваться в виде зубков, резцов, наплавов, а также в составе композиционных материалов в конструкции матрицы или подложки породоразрушающего инструмента. Большой вклад в вопросы изучения твердых сплавов внесли работы Р. Кифера, В.С. Панова, А.М. Чувилина, В.И. Третьякова, Г.А. Зеликмана, Н.И. Романовой, О.П. Колчина и других.

Свойства твердых сплавов на сегодняшний день делают их применение безальтернативным при бурении скважин. Рассмотрим применение твердых сплавов в конструкции шарошечных долот.

В зависимости от характера вооружения все шарошечные долота делятся на 13 типов. Долота типов М, МС, С, СТ, Т выпускаются со стальными фрезерованными зубьями. Для повышения эффективности работы долот их наплавляют твердым сплавом. Для абразивных горных пород применяются долота МЗ, МСЗ, СЗ, ТЗ и ТКЗ, армированные твердосплавными зубками с клиновидной вершиной. Долота типа ТК имеют комбинированное вооружение – стальные зубья и твердосплавные зубки с полусферической вершиной. Долота К и ОК армируют зубками с полусферической вершиной. Твердосплавные зубки различной формы для армирования долот приведены на рис. 2.

Профилированные вставки с покрытием из алмазного композита совершили переворот в характеристиках режущего инструмента во







релитом (рис. 7а). Долота ЗЛ выпускают как с гидромониторными насадками, так и без них. В последнем случае выходные кромки промысловых каналов армируют релитом.

Долота ЗИР в сравнении с ЗЛ имеют следующие отличительные особенности. Три лопасти выполнены притупленными, а не заостренными и приварены к корпусу так, что они сходятся на оси долота, а не наклонены к ней. Лопасти долота армируются так же, как и у ЗЛ типа МС, но с дополнительным усилением кромок лопастей, контактирующих с забоем и стенкой скважины, твердосплавными зубками (штырями) и твердосплавным наплавочным материалом для предохранения от уменьшения диаметра (рис. 7б).

Бурильные головки, помимо разбуривания забоя скважины и калибровки ее стенок, должны также формировать в центре забоя целиковый столбик породы – керн – и предотвращать в процессе бурения любое повреждение керна как образца, служащего источником информации о свойствах буримой породы (рис. 8). Они так же, как и долота, могут быть шарошечными, лопастными и алмазными. Во всех этих конструкциях также используются твердые сплавы.

Твердосплавные коронки предназначены для колонкового вращательно-ударного и вращательного способов проходки скважин в мягких и средней твердости породах I-VIII и частично IX категорий по буримости (рис. 9).

Твердосплавные коронки геологоразведочного назначения подразделяются на три основные группы: I группа – для бурения мягких



Рис. 3. Профилированные вставки с синтетическими поликристаллическими алмазами.

пород (ребристые, крупнорезцовые) типа М; II группа – для бурения малоабразивных пород средней твердости (гладкостенные, резцовые) типов СМ и СТ; III группа – для бурения абразивных пород средней твердости (гладкостенные, микрорезцовые или самозатачивающиеся) типа СА. Кроме того, для бурения инженерно-геологических скважин в монолитных малоабразивных породах III-V категории по буримости, а также отверстий в железобетонных конструкциях с арматурой диаметром до 12 мм применяют коронки КТ. Все эти коронки оснащены твердосплавными резцами различной формы.

Авторами была предложена новая конструкция буровой твердосплавной коронки БТК с усовершенствованной схемой расположения твердосплавных резцов со следующими свойствами:

- твердосплавные пластины имеют по радиусу неравномерные размеры;

- неравномерные пластины расположены асимметрично относительно средней окружности коронки;

- неравномерные твердосплавные пластины расположены с чередованием по наружному и внутреннему диаметрам коронки.

Это позволяет уменьшить ширину целика горной породы, образующегося на забое, и требуемые касательные напряжения для разрушения этого целика [1].

Также отметим новую коронку КТСС, разработанную специалистами ЗАО ГПП «ЭЗТАБ», которая по результатам производственных испытаний выявила увеличение средних показателей проходки на коронку и механической скорости бурения, по сравнению с применяемыми серийными коронками СМ-5 [2].

Твердые сплавы также применяют при изготовлении алмазного инструмента (коронки, долота, бурильные головки, расширители), инструмента, оснащенного славутичем (долота,

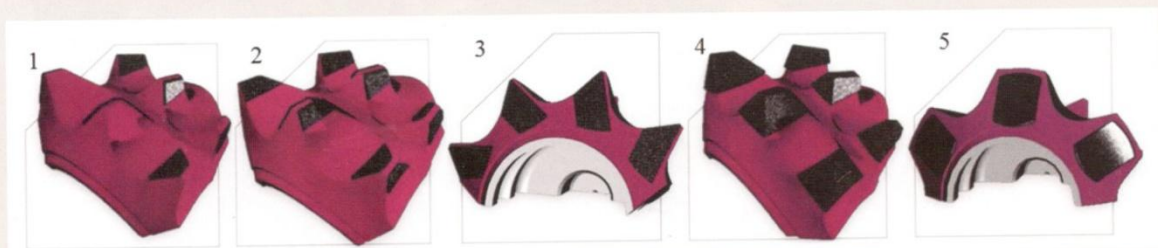


Рис. 4. Схемы армирования фрезерованных зубьев: 1 – наплавляется только одна грань; 2 – наплавляется набегающая грань и часть сбегающей грани; 3 – наплавляются полностью торцы Г- и Т-образных зубьев; 4 – Т-усиленная объемная наплавка зубьев; 5 – W-усиленный периферийный (калибрующий) ряд.





Рис. 5. Армирование козырька лапы долота.



Рис. 6. Твердосплавная наплавка шарошки.

бурильные головки, расширители), а также для инструмента, оснащенного гибридным алмазным композиционным материалом (коронки).

Алмазное долото состоит из стального корпуса с присоединительной резьбовой головкой и алмазосущей головки – матрицы (рис. 10).

Алмазосущую головку изготавливают методом прессования и спекания: в пресс-форму засыпают твердосплавный порошкообразный материал, алмазы укладываются по определенной схеме. Рабочая фасонная поверхность (матрица) выполнена из порошкообразного или зернистого твердого сплава, пропитанного твердым припоем и спаянного в процессе пропитки со стальным корпусом.

Алмазное долото разделяется на секторы напорными каналами, которые соединяются с центральным промывочным отверстием.

Импрегнированные долота – это алмазные долота, в которых при изготовлении объемные алмазы перемещаются с материалом матрицы – твердосплавной шихтой, – обеспечивая тем самым равномерную насыщаемость матрицы алмазами с примерно равномерным распределением мелких зерен алмазов в объеме матричного материала.

Также необходимо отметить, что твердые сплавы применяются при изготовлении долот и бурильных головок типа PDC. Основным элементом вооружения долот PDC являются алмазно-твердосплавные резцы ATP – резцы PDC (Poly diamond compact). Резец имеет твердосплавную основу, покрытую слоем поликристаллического алмаза толщиной от 0,5 до 5 мм (рис. 11). Послойное расположение указанных материалов обеспечивает оптимальное сочетание твердости, износостойкости и прочности на изгиб, так как прочность твердого сплава на изгиб на 70% выше прочности на изгиб поликристаллического алмаза.

Наплавки из твердого сплава широко применяют не только для армирования породоразрушающих элементов шарошечных долот или головок, лопастных долот или пикобуров, но и для шнековых долот или шнеков.

Шнек представляет собой трубу с навитой на нее спиралью. Спираль получают путем навивки стальной ленты (обычно толщиной 5 мм) на винтовую оправку. На конец трубы приваривают элементы соединения. При бурении по абразивным породам для снижения износа шнеков на их наружную

кромку выполняется наплавка из твердого сплава (рис. 12).

Кроме системы вооружения, твердые сплавы также используются для упрочнения элементов, работающих в тяжелых условиях, в системах промывки и опоры.

Большинство долот, выпускаемых различными фирмами мира, имеют две основные схемы промывки – центральную или боковую (гидромониторную). При этом стандартной является боковая промывка через сменные гидромониторные насадки. Вариантами боковой промывки является промывка через минимально удлиненные и удлиненные (приближенные к забою) насадки. Как стандартные, так и миниудлиненные насадки изготавливаются, как правило, из вольфрамокобальтового необходимого износостойкости насадок даже в условиях прокачки через них скоростных потоков промывочной жидкости с большим содержанием абразивных частиц.

Максимально удлиненные насадки состоят из стальных приварных патрубков, подводящих промывочную жидкость к забою скважины, на выходе которых установлены стандартные или миниудлиненные твердосплавные гидромониторные насадки (рис. 13).

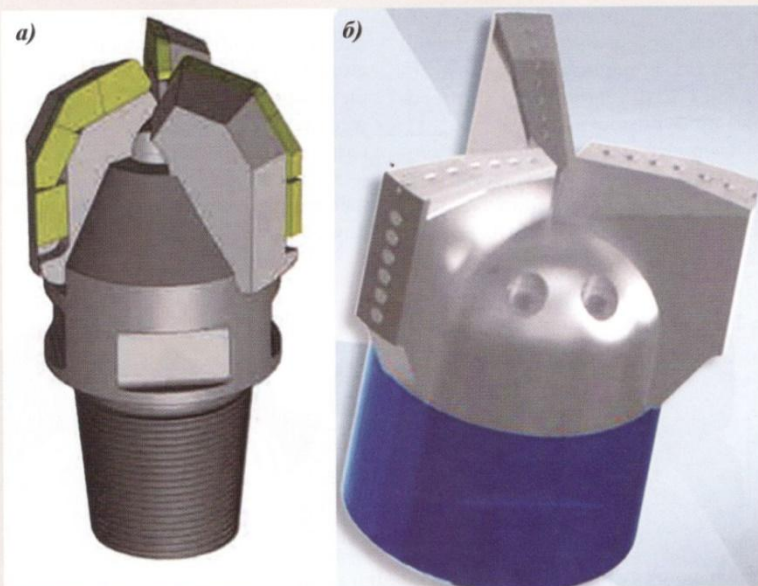


Рис. 7. Лопастные долота: а – ЗЛ; б – ЗИР.



Наружные поверхности патрубков, обращенные к стенкам скважины для предохранения от абразивного износа, как правило, армируются износостойкой наплавкой на основе карбида вольфрама или/и твердосплавными зубками.

В опорах шарошечных долот за счет наплавки твердым сплавом поверхностей радиального и упорного подшипников скольжения повышается их стойкость. Поверхность упорного бурта цапфы лапы также наплавляют твердым сплавом (рис. 14). Кроме породоразрушающего инструмента, твердые сплавы нашли применение и для других видов технологического инструмента – в бурильной колонне и в колонковом наборе.

*Центраторы* служат для центрирования низа бурильной колонны и являются составной частью КНБК. По конструктивному исполнению могут быть лопастными и шарошечными. В качестве основного вооружения в корпусных центраторах используются твердосплавные зубки как в шарошечных, так и в лопастных центраторах (рис. 15а). Центраторы снижают вибрации и защищают керн от разрушения.

*Стабилизатор* так же служит для сохранения жесткой соосности бурильной колонны и скважины. От центратора он отличается большим продольным размером, обычно его длина в 20-30 раз превышает диаметр (рис. 15б).

*Калибратор* – породоразрушающий инструмент для обработки стенок и сохранения номинального диаметра скважины – устанавливается непосредственно над долотом и одновременно выполняет функции центратора. Как и центраторы, могут быть шарошечными или лопастными и оснащаться твердым сплавом.

*Кернорватель* предназначен для срыва керна в конце рейса и удержания его при подъеме инструмента. Рациональная область применения кернорвателей – монолитные и слаботрещиноватые горные породы. Кернорватели используются в одинарных и двойных колонковых наборах с алмазными и твердосплавными коронками.



Рис. 8. Шарошечные и лопастная бурильные головки.



Рис. 9. Твердосплавные коронки.



Рис. 10. Алмазные долота.



Рис. 11. PDC долото и резец: 1 – алмазный слой; 2 – твердосплавная основа.





Рис. 12. Наплавка шнека твердым сплавом.



Рис. 13. Различные виды гидромониторных насадок.

Кернорватель К-46 (59,76) для бурения одинарной колонковой трубой состоит из кольца с разрезом и корпуса. В корпусе кернорвателя имеется внутренняя коническая проточка, заканчивающаяся буртом, в который упирается кольцо в процессе бурения. Ресурс кольца зависит от степени абразивности и трещиноватости разбуриваемой породы и составляет 10-40 м бурения. Кернорвательное кольцо для твердосплавных коронок имеет сквозные окна в стенке, снижающие его жесткость; внутренние выступы кольца армированы пластинами твердого сплава. Корпус кернорвателя имеет на наружной поверхности два

центрирующие кольца с наплавками релита (рис. 16).

Нанесение износостойких наплавок (хардбендинг) на замковую часть бурильных труб (БТ) – современный и эффективный способ продления срока службы инструмента.

По статистике, основной причиной отбраковки трубы при инспекции является именно уменьшение наружного диаметра ниппеля и муфты. Использование хардбендинга позволяет этого избежать.

Хардбендинг – процедура нанесения поясков из специального твердого сплава на переводники, муфту и/или ниппель бурильной трубы. В результате, с обсадной колонной или открытым стволом скважины

контактирует не металл замка, а защитный пояс, который и защищает трубу от износа.

Как правило, защитная наплавка наносится на муфту (3 пояска шириной по 1 дюйму каждый) или на ниппель (2 пояска). Для повышенной защиты при бурении в сложных условиях хардбендинг может наноситься на оба конца трубы сразу (рис. 17).

Экономический эффект от применения БТ с хардбендингом:

- продление срока эксплуатации бурильной трубы до 3 раз;
- уменьшение износа замка на 6-15% в зависимости от типа применяемого хардбендинга;
- снижение износа стенки обсадной трубы на 14-20% по сравнению с воздействием от незащищенного замка;
- уменьшение потерь на трение в скважине;
- уменьшение необходимого момента вращения ротора и, значит, снижение энергозатрат;
- увеличение производительности бурения;
- уменьшение сроков бурения;
- снижение аварийности бурильной и обсадной колонн при строительстве скважины<sup>1</sup>.

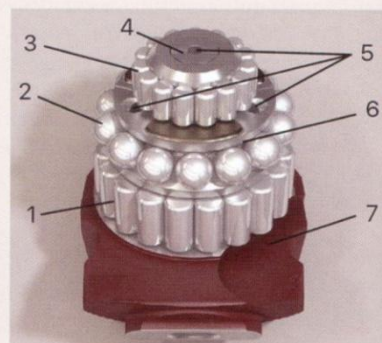


Рис. 14. Система опоры шарошечных долот: 1 – внешний роликовый подшипник; 2 – шарикоподшипник; 3 – внутренний роликовый подшипник; 4 – подпятник; 5 – воздушные каналы; 6 – торцевой подшипник скольжения; 7 – щелевое отверстие для выпуска воздуха.

<sup>1</sup>Хардбендинг [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.temerso.ru/uslugi/hardbending/>.





Рис. 15. Центрирующие элементы: а – центратор; б – стабилизатор.



Рис. 16. Кернорватели.

При бурении с одновременной обсадкой обсадными трубами или прокладке инженерных коммуникаций бурением применяются башмаки обсадных колонн с различными видами твердосплавного вооружения – зубками или сменными полосами или накладками (рис. 18).

Шарнирные трубные ключи используются для свинчивания и развинчивания соединений бурильных свечей (труб), а также для сборки и разборки свечей (рис. 19).

К специальному и аварийному инструменту, оснащеному твердым сплавом, относятся различные виды фрезеров. Их конструкции рассмотрим на примере продукции НПП «Буринтех»<sup>2</sup> (рис. 20).

*Фрезеры забойные торцевые*

Фрезер забойный типа ФЗ2 предназначен для фрезерования металлических предметов, находящихся на забое скважины. Режущая поверхность фрезера армирована композиционным материалом, состоящим из крошек дробленого твердого сплава.

Фрезер забойный специальный типа ФЗ2 Сп предназначен для разбуривания цементных мостов, песчаных пробок, технологической оснастки обсадных колонн, фрезерования металлических предметов, находящихся на забое скважины. Благодаря применению пластин из твердого сплава и обеспечения эффекта самозатачивания, достигается эффективное резание при высокой скорости проходки.

Фрезер забойный спиральный типа ФЗС2 предназначен для разбуривания цементных мостов, песчаных пробок, технологической оснастки обсадных колонн, фрезерования металлических предметов, находящихся на забое скважины. Характерной особенностью данного инструмента является оснащение режущего торца и калибрующих лопастей спиральной формы армирующей твердосплавной крошкой.

*Фрезеры кольцевые*

Фрезер кольцевой типа ФК2 имеет массивную режущую кромку, армированную твердосплавной крошкой и предназначен для работы в тяжелых условиях по крупным металлическим предметам.

Фрезер кольцевой типа ФК2 Сп армирован твердосплавными крошкой и зубками. Предназначен

для фрезерования (обуривания) прихваченных бурильных и насосно-компрессорных труб, а также насосных штанг.

Все кольцевые фрезеры выпускаются с фаской под приварку.

*Фрезеры комбинированные*

Фрезер забойно-кольцевой типа ФЗК2 представляет собой сочетание кольцевого и забойного фрезеров. Предназначен для сплошного фрезерования труб, незакрепленных металлических предметов с опережающим фрезерованием кольцевого пространства в обсаженной скважине.

Фрезер забойно-кольцевой типа ФЗК2 Сп представляет собой сочетание фрезеров кольцевого и забойного специального. Благодаря применению в данной конструкции пластин из твердого сплава и обеспечения эффекта самозатачивания, достигается эффективное резание при высокой скорости проходки.

Фрезер пилотный типа ФП предназначен для фрезерования элементов колонны труб, таких как НКТ, хвостовиков, пакеров, замков, муфт



Рис. 17. Наплавка твердым сплавом замковых соединений бурильной колонны.



Рис. 18. Стартовый башмак обсадных труб фирмы Bauer.



Рис. 19. Шарнирный буровой ключ со сменной вставкой с твердосплавным покрытием.

<sup>2</sup>Фрезеры [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://burintekh.ru/products/mills/>.





Рис. 20. Фрезеры НПП «Буринтех» (слева направо Ф32, Ф32 Сп, ФК2;ФМ, ФКК2, РК2, ФР, ДТФ).

при проведении ремонтно-восстановительных работ в скважине. Основная отличительная особенность конструкции данного инструмента в том, что режущая поверхность армирована композиционным материалом, состоящим из крошек дробленого твердого сплава и материала связки.

Фрезер магнитный типа ФМ – универсальный инструмент, предназначенный для извлечения из скважины металлических предметов, обладающих ферромагнитными свойствами.

#### Фрезеры колонные конусные

Предназначены для проработки труб, имеющих эллипсность (для восстановления внутреннего диаметра), расфрезеровывания смятых труб при проведении

ремонтно-восстановительных работ в скважинах, снятия неровностей с внутренней поверхности обсадных колонн, очистки «окна» в обсадной колонне. Основная отличительная особенность данного инструмента – конусная форма рабочей поверхности, которая армируется твердосплавной крошкой. Фрезер колонный конусный типа ФКК2 имеет угол конуса  $10^\circ$ , а райбер конусный типа РК2 –  $5^\circ$ .

#### Фрезер-райбер и долото-фрезер

Фрезер-райбер типа ФР предназначен для разбуривания цементных мостов, песчаных пробок, технологической оснастки обсадных колонн небольших диаметров, а также фрезерования металлических предметов, находящихся на забое скважины. Благодаря применению

пластин из твердого сплава и обеспечения эффекта самозатачивания, достигается эффективное резание при высокой скорости проходки.

Долото-фрезер типа ДТФ предназначено для разбуривания цементных мостов, песчаных пробок и технологической оснастки при благоприятных условиях с малыми ударными нагрузками.

#### Выводы

Проанализированы возможные способы применения твердых сплавов при бурении скважин.

Предложена классификация бурового инструмента, содержащего твердый сплав.

Рассмотрены конструкции различных инструментов и особенности применения твердых сплавов в их конструкции.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кожевников А.А. и др. Твердосплавный породоразрушающий инструмент нового типа. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. научных трудов. – Киев: ИСМ им В.Н. Бакуля НАН Украины, 2016. – Вып. 19. – С. 50-55.
2. Хамидуллин А.К. и др. Совершенствование технологии бурения геологических скважин на объектах ОАО АК «АЛРОСА». // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. научных трудов. – Киев: ИСМ им В.Н.Бакуля НАН Украины, 2015. – Вып. 18. – С. 16-21.

Статья публикуется по рекомендации члена редакционной коллегии, доктора технических наук И.Н. Столповский