

УДК 622.24.051.64

Эффективность разрушения твердых горных пород буровыми коронками с матрицей, оснащенной моно- и поликристаллическими алмазами

Богданов Р. К., Шульженко А. А., Загора А. П., Исонкин А. М., Гаргин В. Г.

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

Аннотация

Рассматриваются физико-механические свойства нового поликристаллического материала на основе алмаза (АКТМ) и возможности его применения в породоразрушающем инструменте для бурения скважин в твердых горных породах. Приведены результаты исследований по определению механической скорости бурения твердых горных пород коронками, оснащенными вставками АКТМ. Установлена взаимосвязь между величиной параметров шероховатости забоя скважины и механической скоростью бурения.

С разработкой в ИСМ новых поликристаллических материалов на основе алмаза, в частности АКТМ, появилась возможность создания новых типов породоразрушающего инструмента из синтетических алмазов для бурения скважин в твердых породах.

Для формирования поликристаллической структуры на основе алмаза, для которой характерен сплошной каркас из алмазных частиц, первоочередным процессом является формирование связи алмаз-алмаз. Основная роль в этом процессе принадлежит пластической деформации алмазных частиц под воздействием высоких давлений. Во время смачивания алмазного каркаса кремнием, проникающего в межзеренные промежутки из пропитывающего слоя, который выполняет в этом случае роль технологичной среды, происходит взаимодействие в системе алмаз-кремний, что приводит к формированию в межалмазных промежутках карбида кремния. Образование дополнительной связи алмаз-карбид увеличивает общую прочность поликристаллического материала.

Физико-механические свойства алмазного композиционного термостойкого материала представлены в таблице 1.

Табл. 1. Физико-механические свойства АКТМ.

Плотность, г/см ³	3,45	Модуль Юнга, ГПа	970
Твердость по Кнупу, ГПа	50–55	Теплопроводность, Вт/(мК)	250–300
Трещиностойкость, МПа м ^{1/2}	10–12	Износостойкость при правке корундового круга, мг/кг	~ 4,4
Прочность на сжатие, ГПа	2,2–3,1	Термостабильность, К	~ 1500

Как видно из табл. № 1, термостабильность материала АКТМ является высокой и составляет 1500 К. Это позволяет использовать его для изготовления бурового инструмента с высокой температурой спекания.

В силу того, что прочность на сжатие вставок АКТМ ниже показателя твердости основных представителей твердых горных пород, то они не могут эффективно внедряться в породы выше IX категории (табл. 2). Поэтому для таких пород инструмент на их основе должен быть не резцового, а истирающего типа, т. е. импрегнированный инструмент с комбинированной матрицей.

С целью расширения объемов бурения инструментом из синтетических алмазов в более твердых породах в ИСМ были выполнены исследования по разработке нового типа бурового инструмента на основе комбинации алмазов марки АС160Т и вставок АКТМ, а также установления эффективности разрушения им горных пород. В нашем случае, под эффективностью разрушения горных пород принимаем сочетание высокой механической скорости бурения инструментом с максимальными показателями параметров шероховатости микропрофиля забоя скважины [1, 2].

Таблица 2. Характеристика некоторых типов горных пород.

Наименование породы	Твердость по Шрейнеру, ГПа	Категория пород по буримости
Мрамор	1,39	VI
Известняк	1,84	VII
Кварцевый альбитофир	2,88	VIII
Гранит	3,78	IX
Роговик безрудный	4,17	X
Роговик магнетитовый	6,19	XI
Роговик пегматито-магнетитовый	7,44	XII

В процессе исследований изучалось влияние вставок АКТМ диаметром 1,3 и 1,9 мм на работоспособность бурового инструмента.

Для проведения исследований была разработана конструкция опытной коронки с плоским торцом. За основу была принята конструкция коронки типа БС01 \varnothing 59 мм. Схема оснащения рабочего торца опытной коронки приведена на рис. 1.

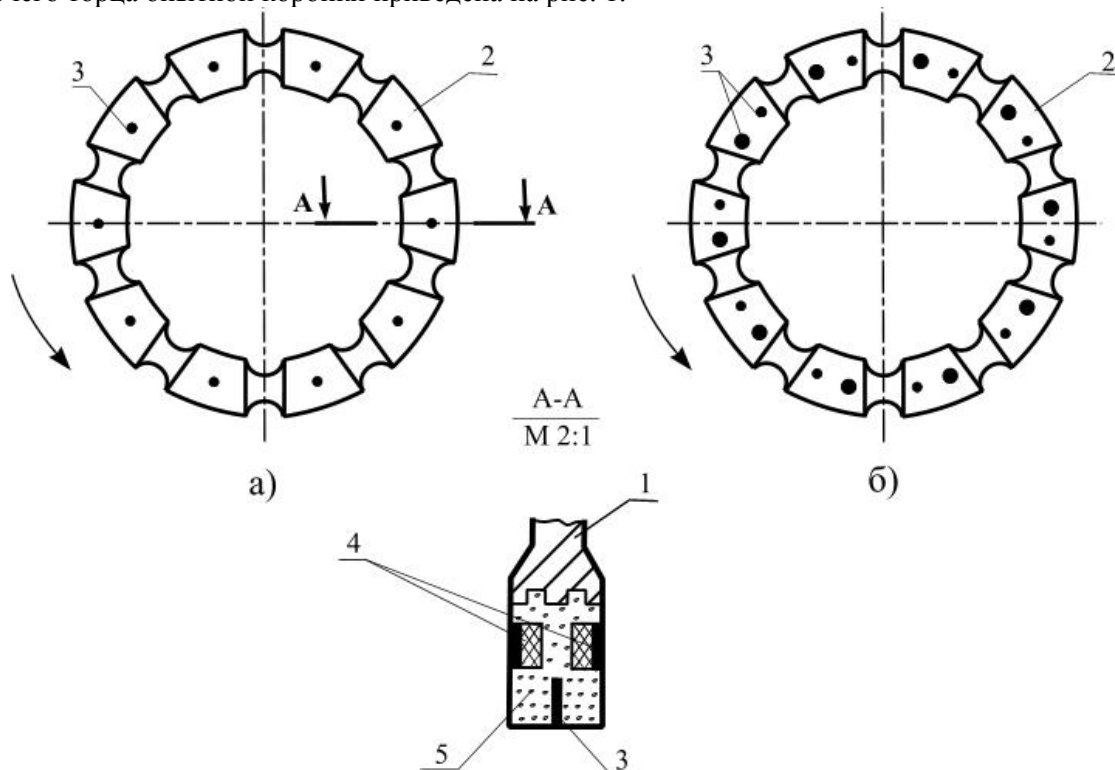


Рис. 1. Схема оснащения рабочего торца опытной коронки:

- а) оснащенная вставками АКТМ \varnothing 1,3 или 1,9 мм; б) оснащенная вставками АКТМ \varnothing 1,3 и 1,9 мм
 1 – корпус коронки; 2 – алмазодержащая матрица; 3 – вставки АКТМ;
 4 – подрезные вставки тесала; 5 – алмазы

Было изготовлено 4 типа инструмента:

- коронка не оснащалась вставками АКТМ (№1);
- в центральной части каждого сектора устанавливалась вставка АКТМ \varnothing 1,3 мм (№2);
- в центральной части каждого сектора устанавливалась вставка АКТМ \varnothing 1,9 мм (№3);
- в каждом секторе устанавливались по одной вставке АКТМ \varnothing 1,3 мм и 1,9 мм (№4).

Испытания выполнялись в лабораторных условиях при бурении скважин в блоке коростышевского гранита X категории по буримости.

Параметры режима бурения были приняты следующими:

- частота вращения – 630 мин^{-1} ;
- осевая нагрузка – 1000 даН.

На рис. 2 представлена полученные в результате испытаний зависимости изменения механической скорости бурения опытных образцов коронок от проходки.

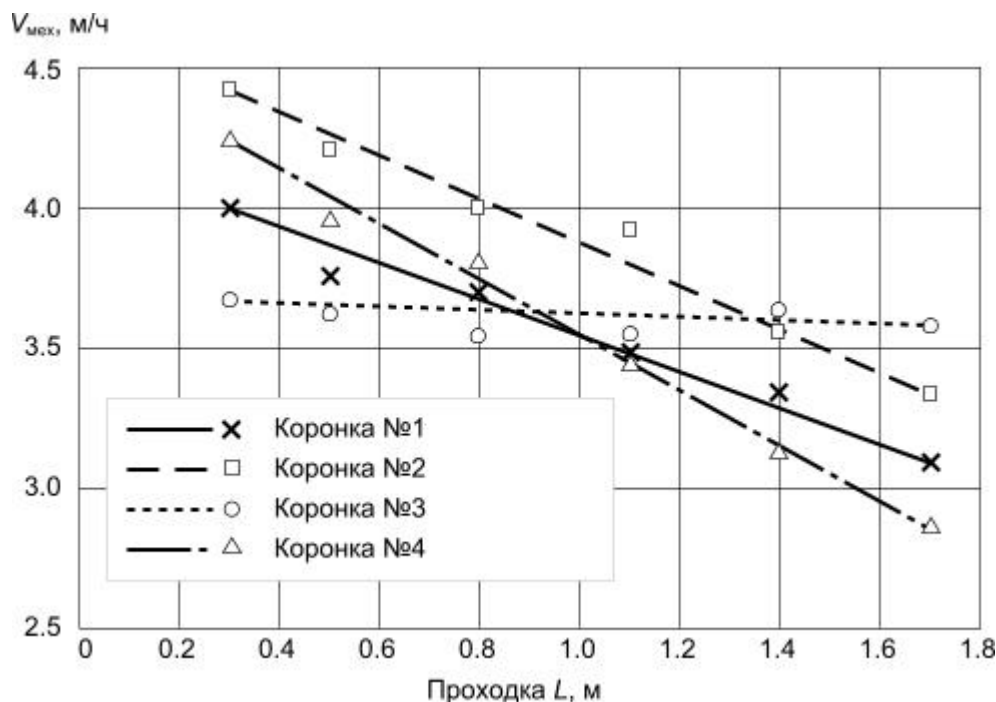


Рис. 2. Зависимость механической скорости бурения коронками от проходки

С увеличением проходки механическая скорость бурения опытными коронками, кроме коронок №3, уменьшается. Наибольшей механической скоростью бурения (в рассматриваемых пределах проходки) обладают коронки №2. Наиболее интенсивное падение механической скорости бурения отмечается у коронки №4. У коронки №3 в рассматриваемых пределах проходки отмечается незначительный рост механической скорости бурения.

На рис. 3 и 4 представлен характер износа породоразрушающей части секторов коронок после завершения их испытаний.

Изучая картину износа, представленную на рис. 3 и 4, можно отметить следующее. Алмазы в коронке №1 (рис. 3 а) в большинстве своем изношены и имеют значительное количество площадок затупления. Борозды на поверхности матрицы неглубокие, что свидетельствует об образовании в зоне контакта шлама небольшого размера. Наличие части шлама малого размера свидетельствует о малой эффективности процесса разрушения породы, что подтверждается зависимостью представленной на рис. 2.

Характер износа коронки №2 (рис. 3 б) отличается от характера износа коронки №1. Количество целых алмазов на поверхности трения в коронке №2 больше, чем в коронке №1, и борозды более глубокие. Можно констатировать, что вставка защищает алмазы, и процесс разрушения породы происходит более эффективно. Это также подтверждается и зависимостями на рис. 2.

Характер износа сектора на рис. 4 а в значительной степени близок к характеру износа, представленного на рис. 3 б. У коронки №3, как видно на рис. 4 а, площадки заполировки на алмазах практически отсутствуют.

На рис. 4 б представлен характер износа коронки №4. На поверхности матрицы, контактировавшей с породой, наблюдается большое количество лунок от вырванных из нее алмазных зерен. Это свидетельствует о работе коронки такой конструкции в режиме вибрации. На последнем этапе испытаний отмечается самая низкая работоспособность коронки №4 по сравнению с другими инструментами.



а) без АКТМ



б) АКТМ $\varnothing 1,3$ мм

Рис. 3. Характер износа породоразрушающей части секторов коронок №1 (а) и №2 (б)



а) АКТМ Ø1,9 мм



б) АКТМ (Ø1,3 мм + Ø1,9 мм)

Рис. 4. Характер износа породоразрушающей части секторов коронки №3 (а) и №4 (б)

Как известно [3], механическая скорость бурения, при всех равных прочих показателях, оценивается параметрами шероховатости забоя скважины:

$$V_{\text{мех}} = \frac{0,12 P_{\text{ос}} \eta k_p n_{\text{бор}} n \sqrt{R_z (2R_{\text{ал}} - R_z)}}{p_{\text{ш}} \pi R_{\text{ал}} n_s S_k \zeta_a (D_{\text{н}} - D_{\text{вн}})},$$

где: $V_{\text{мех}}$ – механическая скорость бурения, мм/мин; $P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка на буровую коронку, даН; $\eta = f(\alpha)$ – функция, учитывающая степень влияния эффекта Ребиндера при разупрочнении разрушаемой горной породы; k_p – коэффициент разрыхления породы; $n_{\text{бор}}$ – количество борозд, необходимое для полного поражения забоя скважины; n – частота вращения, мин⁻¹; $R_{\text{ал}}$ – радиус алмазного зерна, взаимодействующего с породой, мм; R_z – средняя высота микронеровностей (шероховатость) поверхности забоя от воздействия алмазной коронки, мм; $p_{\text{ш}}$ – твердость горной породы (по Шрейнеру Л. А.), даН/мм²; n_s – число алмазов на единице площади, шт/мм²; S_k – площадь рабочего торца коронки, мм²; ζ_a – коэффициент, учитывающий доленое количество алмазов активно участвующих в разрушении горной породы; $D_{\text{н}}$ и $D_{\text{вн}}$ – соответственно, наружный и внутренний диаметры коронки, мм.

Нами были проведены исследования по установлению взаимосвязи между величиной параметров шероховатости забоя скважины и механической скоростью бурения опытными коронками в твердых горных породах.

Изучение характера разрушения забоя горной породы опытными коронками проводилось по разработанной в ИСМ методике изучения микропрофиля поверхности забоя, сформированного при алмазном бурении. Указанная методика состоит в следующем.

Из подготовленных плит горных пород толщиной 50–60 мм с помощью специальной оправки опытной коронкой, на заранее заданных режимах работы, выбуриваются керны со сформированным забоем.

Специальная оправка позволяет выбуривать керны с минимальным отклонением по соосности цилиндрических поверхностей керна (допускаемое отклонение по соосности – 0,01 мм). Это гарантирует concentricity линий резания на забое горной породы, что необходимо для получения в дальнейшем результатов математического обсчета профиля поверхности забоя с высокой точностью. Во время экспериментального бурения для получения достаточно достоверной информации о параметрах микропрофиля поверхности забоя необходимо производить мгновенную остановку вращающейся буровой колонны с одновременным снятием осевой нагрузки. Причем при хорошо «вскрытой» матрице коронки проходка достаточна в пределах 10–20 мм. Далее полученные образцы кернов со сформированным забоем, предварительно очищенные от шлама, направляются для дальнейшего исследования в систему измерения шероховатости поверхности (рис. 5).

Система измерения шероховатости поверхности разработана на базе профилометра-профилографа модели 201 «Калибр», ПЭВМ и АЦП (аналого-цифровой преобразователь). Для выполнения настоящих исследований в системе использован мотопривод с датчиком (специальный шуп с алмазной иглой).

Принцип работы системы измерения шероховатости поверхности заключается в следующем. Дифференциальный сигнал о профиле поверхности снимается с выхода самописца профилометра и с помощью делителя нормируется к уровню примерно 100. Нормированный сигнал затем по кабелю подается на дифференциальный вход АЦП.

Полученный через АЦП сигнал от датчика обрабатывается ПЭВМ с помощью специально разработанной для данных исследований программы расчета параметров микропрофиля поверхности SURF для Windows XP. Программа SURF позволяет измерить микрогеометрию поверхности образца буримой горной породы, произвести расчет параметров шероховатости и результат графически (в режиме реального времени) отобразить на экране монитора или вывести на принтер в виде протокола.

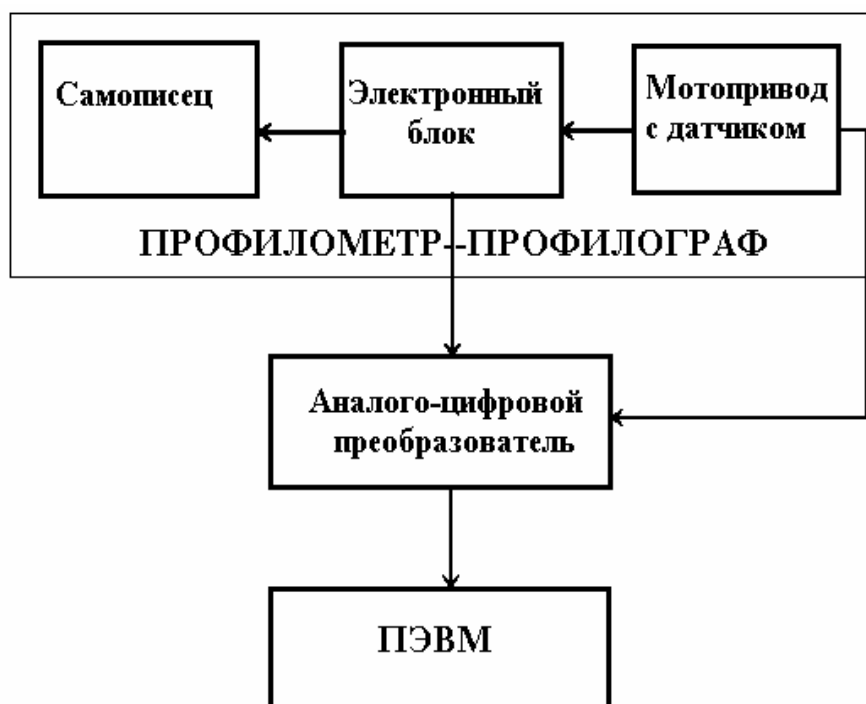


Рис. 5. Структурная схема измерения шероховатости поверхности

Для выборки кернов, необходимых для исследования, в данной методике используется буровой стенд на базе радиально-сверлильного станка модели 2Н58.

Техническая характеристика бурового стенда:

1. Осевая нагрузка на бурильную колонну 0–4000 даН.
2. Частота вращения шпинделя 0–1200 мин⁻¹.
3. Расход промывочной жидкости 0–30 дм³/мин.
4. Возможные виды подачи бурового снаряда ручная, механическая и гидравлическая.

В качестве объекта исследований по приведенной методике применялись заранее подготовленные плиты толщиной 50–60 мм из коростышевского гранита.

Для вращения кернов с исследуемым забоем под иглой-щупом профилографа-профилометра используется мотопривод, разработанный на базе механического привода реле времени типа ВС 10-34.

Схема расположения трасс ощупывания представлена на рис.6.

Согласно ГОСТ 2789-82 вычислялись все основные и дополнительные высотные параметры шероховатости поверхности забоя, а также статистические параметры профиля. Однако, для оценки разрушающей способности опытного бурового инструмента делалась выборка результатов измерений следующих параметров микропрофиля поверхности забоя:

1. R_a – среднее абсолютное отклонение профиля;
2. R_z – отклонение профиля по десяти точкам;
3. R_{max} – расстояние между наивысшей и наименьшей точками профилограммы;
4. S_m – средний шаг неровностей по средней линии.

Представленная здесь методика имеет существенные преимущества по сравнению с известными методиками. Громоздкое и морально устаревшее оборудование мини-ЭВМ СОУ-1 заменено ПЭВМ, позволяющей с помощью нового специально разработанного для этих исследований программного обеспечения ускорить процесс обчета микрорельефа поверхности забоя горной породы в десятки раз. Блок связи заменен на аналого-цифровой преобразователь с USB 2.0 интерфейсом. В программном обеспечении учтены имеющиеся ошибки обчета параметров шероховатости известных методик.

Пример профилограммы представлен на рис. 7.

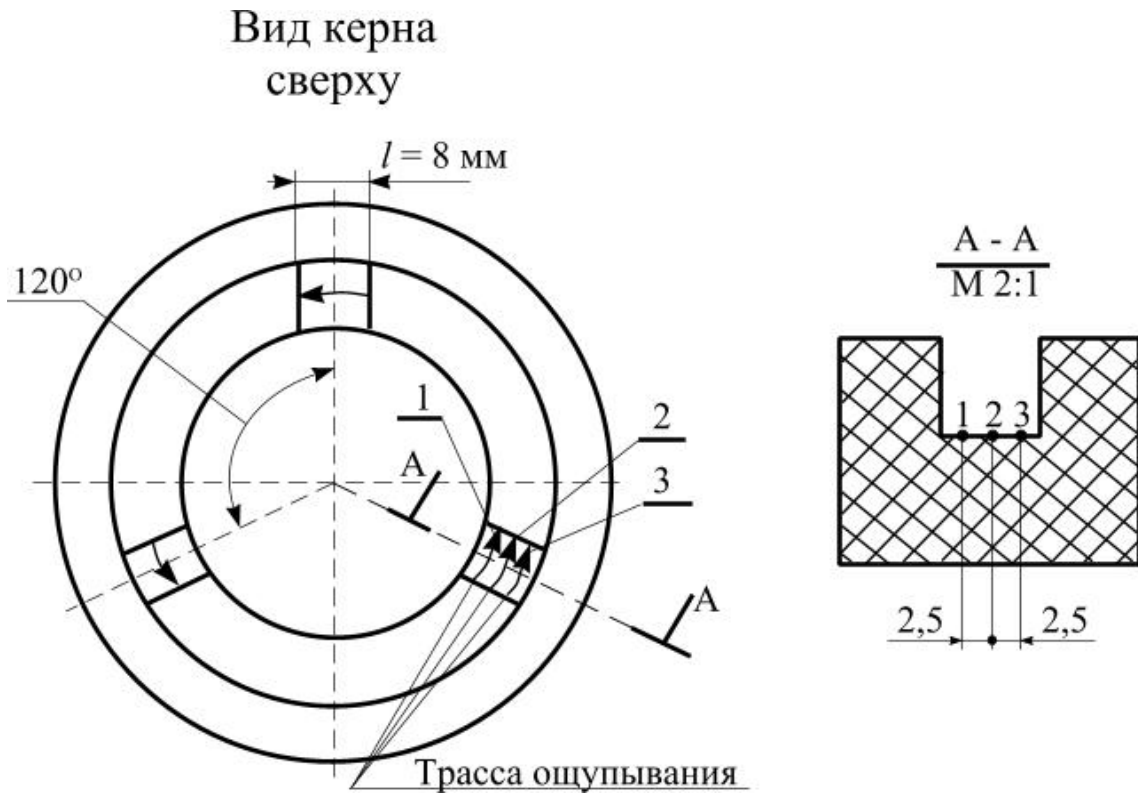


Рис. 6. Схема расположения трасс ощупывания забоя горной породы.

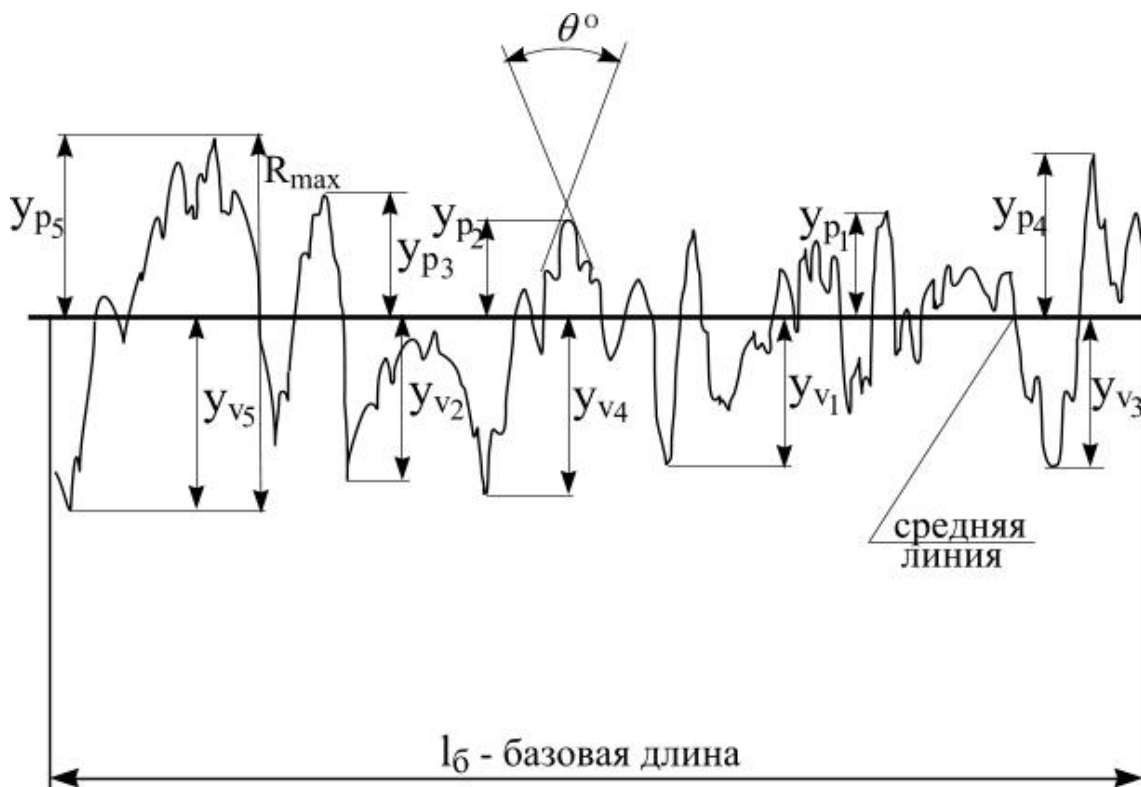


Рис. 7. Профилограмма микропрофиля поверхности забоя горной породы.

Результаты исследований параметров шероховатости микропрофиля поверхности забоя, полученные в процессе бурения коростышевского гранита опытными коронками, оснащенными синтетическими монокристаллическими алмазами AC160T и вставками АКТМ, приведены в табл. 3.

Табл. 3. Результаты измерения параметров шероховатости микропрофиля поверхности забоя в кернах горных пород

№ коронки	Характеристика коронки	Параметры шероховатости по ГОСТ 25142-82 (средние значения)			
		R_a , мм	R_z , мм	R_{max} , мм	S_m , мм
1	Без вставок	1,143	4,438	6,656	350,94
2	Со вставками АКТМ Ø1,3 мм	1,978	6,599	11,278	503,64
3	Со вставками АКТМ Ø1,9 мм	0,756	3,262	4,333	265,69
4	Со вставками АКТМ Ø1,3 + 1,9 мм	2,609	7,332	11,944	548,57

Как видим, значения параметров шероховатости забоя коростышевского гранита у всех четырех коронок разные. Наибольшее значение параметра R_z у коронок №4 и №2, наименьшая – у коронок №1 и №3. Такая же картина отмечается и по другим параметрам шероховатости.

Анализируя данные табл. 3 и сопоставив их с данными, представленными на рис. 2, можно сделать вывод, что при увеличении R_z механическая скорость бурения коронками выше. С увеличением проходки механическая скорость бурения падает, что можно объяснить заполировкой алмазов. Резкое падение механической скорости бурения наблюдается при использовании коронок №4. Сравнивая эту зависимость с характером износа коронки №4 (см. рис. 4 б), становится очевидным, что такое падение скорости бурения вызвано нарушением режущей способности коронки за счет интенсивного вырыва и разрушения алмазов матрицы. Наиболее стабильна, хотя в первоначальный момент и самая меньшая, механическая скорость бурения при использовании коронок №3.

Очевидно, этот результат можно объяснить тем, что площадь контакта вставок коронки №3 больше площади контакта вставок коронки №2 и, согласно рис. 4 а, в пределах испытаний данный фактор приводит к более надежной защите синтетических алмазов матрицы от износа.

Выводы.

1. Поликристаллический материал АКТМ на основе синтетических алмазов, изготовленный в виде цилиндров Ø1,3 мм и Ø1,9 мм в совокупности с монокристаллическими синтетическими алмазами способен эффективно разрушать твердые горные породы.
2. Наилучшие показатели по механической скорости бурения имеют коронки, оснащенные вставками АКТМ Ø1,3 мм.
3. Практически доказано, что параметры шероховатости микропрофиля поверхности забоя твердых горных пород взаимосвязаны с механической скоростью бурения их коронками, оснащенными вставками АКТМ в комбинации с синтетическими монокристаллическими алмазами. С увеличением механической скорости бурения параметры шероховатости микропрофиля забоя возрастают и, как следствие, повышается эффективность разрушения породы буровым инструментом.

Библиографический список

1. Винник Э. М., Свешников И. А. и др. К вопросу о формировании зоны предразрушения горных пород и пути ускорения бурения скважин /Тез. Докл. II Всесоюз. научно-техн. конф. – Уфа, 1978, С. 95–100.
2. Загора А. П., Фадеев В. Ф. К вопросу влияния вставки СКМ на процесс разрушения твердых горных пород коронками с комбинированной матрицей/ Сб.: Синтетические сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении, Киев, ИСМ АН УССР, 1991, с. 63–67.
3. Н. В. Соловьев, В. Ф. Чихоткин, Р. К. Богданов, А. П. Загора. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 1997, 332 с.

© Богданов Р. К., Шульженко А. А., Загора А. П., Исонкин А. М., Гаргин В. Г., 2008.