

УДК 622.243.051

**А. М. Исонкин**, канд. техн. наук

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

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНЫХ БУРОВЫХ КОРОНОК ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ**

*Приведены результаты исследований влияния скорости вращения и интенсивности внедрения алмазных буровых коронок в горную породу на эффективность ее разрушения. Показано, что с повышением скорости вращения алмазной буровой коронки и снижением интенсивности ее внедрения в горную породу снижается энергоемкость ее разрушения и повышается износостойкость инструмента.*

**Ключевые слова:** *шлам горной породы, синтетические алмазы, энергоемкость разрушения, износостойкость, буровые коронки.*

### **Введение**

При алмазном бурении механическое разрушение горной породы как физический процесс характеризуется образованием частиц шлама, которые, согласно принципу П. Кюри, обладают двумя видами энергии – объема и поверхности и подчиняются закону, который выражает соотношение линейных размеров с их удельной поверхностью и удельными затратами энергии на разрушение.

В зависимости от размеров образующихся частиц шлама такие соотношения характеризуются законами Кирпичева–Кика, Риттингера и др. Наиболее полно процесс характеризуется уравнением кинетики, определяющим энергозатраты процесса при объемном характере разрушения.

Энергозатраты на разрушение состоят из затрат энергии на объемное деформирование горной породы алмазами, неупругие деформации, работу по преодолению трения и создания новых поверхностей [1; 2]. При этом согласно энергетическим представлениям при всех видах механического разрушения твердых тел, в том числе горных пород при бурении, физическая природа тела остается неизменной, а изменяется только площадь его поверхности [3; 4].

Согласно обобщенному закону дробления акад. А.П. Ребиндера, независимо от физико-химических свойств твердых горных пород их разрушение можно описать выражением

$$A = qV + \gamma S_n,$$

где  $A$  – энергия разрушения, Дж;  $q$  – удельная объемная энергия разрушения, Дж/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем образца, м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – энергоемкость разрушения, Дж/м<sup>2</sup>;  $S_n$  – площадь вновь образованной поверхности, м<sup>2</sup>.

Результаты исследований [5] свидетельствуют о том, что энергоемкость разрушения не являются константой и зависят от видов и режимов механических воздействий. При этом чем сильнее интенсивность нагружения и выше степень дробления, тем больше энергоемкость разрушения.

Результаты анализа процесса разрушения горной породы алмазным буровым инструментом показывают, что плотность энергии, которую его рабочая поверхность передает в зоне контакта разрушаемой горной породе в единичных актах разрушения, зависит от конструктивных особенностей и технологических параметров режима работы. Необходимую плотность энергии, которая передается горной породе в единичном акте разрушения,

возможно достигнуть путем повышения энергонапряженности прежде всего за счет увеличения кинетической энергии.

Высокий уровень кинетической энергии достигается повышением скорости вращения. Чем выше скорость вращения, тем больше динамическая составляющая разрушающей нагрузки, которая в конечном итоге обеспечивает эффективность разрушения горной породы.

Скорость роста трещин не зависит от скорости нагружения [6]. Этот факт послужил основанием для утверждения, что для разрушения тела нужна не постоянная величина разрушающего фактора (напряжения), а постоянная величина энергии.

Механическую активацию разрушения горной породы можно интенсифицировать двумя путями: увеличением доли динамической составляющей разрушающей нагрузки и увеличением количества одновременно протекающих актов разрушения, что обеспечивает сокращение интервалов времени между двумя последовательными актами. Реализация указанных путей возможна только при высокой скорости движения породоразрушающего инструмента [7–9].

Цель настоящей работы – исследовать влияние технологических параметров режима бурения, обеспечивающих его наименьшую удельную энергоемкость, неразрывно связанную с гранулометрическим составом шлама и износостойкостью породоразрушающего инструмента.

#### **Методика эксперимента**

В качестве показателя, позволяющего судить о гранулометрическом составе шлама и эффективном использовании подводимой к забою скважины энергии, приняли его удельную поверхность.

Для определения удельной поверхности частиц шлама использовали широко применяемый на практике метод БЭТ (Брунауэр-Эммет-Теллер), суть которого заключается в установлении количества вещества, физически адсорбирующегося на поверхности твердого тела при образовании мономолекулярного покрытия [10].

Эффективность разрушения горной породы и гранулометрического состава отделяющегося при этом шлама исследовали при бурении скважин глубиной 2 м за единичный опыт в блоке коростышевского гранита алмазными буровыми коронками типа БС-01 диаметром 36, 46, 59 и 93 мм, оснащенными синтетическими алмазами АС80 зернистостью 250/200 мкм. Бурение осуществляли с постоянными углублениями коронки за оборот 30, 45, 57, 63, 72 и 80 мкм и скоростях вращения 250–1000 мин<sup>-1</sup>, что обеспечивало в ходе экспериментов широкий диапазон окружной скорости (0,38–4,34 м/с) и интенсивности внедрения коронок в горную породу – отношения величины углубления коронки за оборот к длине окружности ее рабочего торца, рассчитанной по среднему диаметру.

Пробы отходящего с промывочной жидкостью шлама разрушенной горной породы отбирали и готовили к дальнейшим исследованиям согласно методике, приведенной в [11].

Измерение удельной поверхности и определение изотерм адсорбции-десорбции проводили статическим манометрическим методом по азоту прибором Акусорб-2100 фирмы «Культреникс» (Франция) в соответствии с принципом БЭТ. Дегазацию образцов шлама осуществляли в вакууме  $1,33 \times 10^{-5}$  Па при температуре 200 °С. Объем адсорбированного в монослое азота  $V_a$  (мл/г) рассчитывали по уравнению БЭТ [12].

Эффективность разрушения горной породы оценивали по удельной объемной работе разрушения – отношению затраченной энергии к объему разрушенной породы. Критерием износостойкости служила интенсивность изнашивания матрицы буровой коронки – отношение ее износа по высоте к глубине пробуренной скважины. Осевую нагрузку и тангенциальную составляющую усилия разрушения горной породы измеряли двухкомпонентным динамометром.

В качестве параметра, оценивающего микрогеометрию рабочей поверхности матрицы буровой коронки, приняты высота выступания алмазов. Этот показатель измеряли по специально разработанной методике, предусматривающей использование возможностей растрового электронного микроскопа-микроанализатора «САМСКАН - 4DV» [13].

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Зависимости изменения удельной поверхности шлама и удельной объемной работы разрушения от окружной скорости вращения буровых коронок диаметрами 36, 59 и 93 мм при углублении за оборот 63 и 80 мкм показаны на рис. 1–3.

С повышением окружной скорости вращения значительно снижались объемная работа разрушения и удельная поверхность шлама. Так, с повышением скорости вращения коронки диаметром 36 мм с 250 до 1000 мин<sup>-1</sup> при постоянной подаче 63 мкм/об удельная объемная работа разрушения снизилась с 80,8 до 31,1 Дж/см<sup>3</sup>, а удельная поверхность шлама – с 13,68 до 8,51 м<sup>2</sup>/г. Эти зависимости прослеживались также для коронок диаметром 59 и 93 мм. При постоянной скорости вращения существенное влияние окружной скорости можно видеть за счет увеличения диаметра коронок с 36 до 93 мм, когда повышение окружной скорости в 2,86 раза при постоянной скорости вращения 250 мин<sup>-1</sup> и углублении за оборот 63 мкм привело к снижению удельной объемной работы с 80,8 до 29,3 Дж/см<sup>3</sup>, а удельной поверхности – с 13,68 до 6,33 м<sup>2</sup>/г. Такие же зависимости прослеживались и при скорости вращения 400–1000 мин<sup>-1</sup> и углублениях 63 и 80 мкм за оборот. Максимальное снижение удельной объемной работы разрушения с 80,8 до 14,5 Дж/см<sup>3</sup> и удельной поверхности шлама с 13,68 до 2,68 м<sup>2</sup>/г было достигнуто при повышении окружной скорости с 0,38 до 4,34 м/с вследствие повышения скорости вращения и увеличения диаметра коронок с 36 до 93 мм.

На наш взгляд это неразрывно связано со снижением интенсивности внедрения алмазов на рабочей поверхности коронки при увеличении ее диаметра. Подтверждением этого служат данные рис. 4.

Наименьшей интенсивности внедрения как отношению углубления коронки за оборот к длине окружности по ее среднему диаметру соответствует также наименьшая удельная поверхность шлама, т. е. образуются частицы более крупного размера. При этом энергия на разрушение горной породы затрачивается рациональнее, о чем свидетельствуют данные рис. 5. Закономерность уменьшения удельной поверхности частиц шлама с повышением окружной скорости вращения коронки имеет одинаковый характер при различном углублении за оборот. С повышением окружной скорости вращения с 0,33 до 1,32 м/с удельная поверхность частиц шлама уменьшается примерно в 2 раза, что свидетельствует об увеличении размеров отделяемых фрагментов породы.

Необходимая механическая скорость бурения алмазным породоразрушающим инструментом может быть достигнута только при парном сочетании таких основных режимных параметров, как окружная скорость вращения и осевая нагрузка. При каждом из сочетаний этих параметров обеспечивается определенная интенсивность разрушения горной породы, определяющая величину углубления алмазной коронки за один оборот и объем разрушаемой при этом горной породы.

Повышение скорости вращения с одновременным снижением интенсивности разрушения горной породы позволяет не только достигать высокой скорости бурения, но и способствовать снижению энергоемкости разрушения горной породы, обеспечивая уменьшение динамических нагрузок на алмазы и увеличение их выступания из матрицы, уменьшение концентрации частиц шлама в призабойной зоне и количества их контактов с рабочей поверхностью матрицы коронки (рис. 5).

Целесообразность повышения скорости вращения алмазных коронок, особенно импрегнированных с алмазами мелких фракций, также подтверждается результатами исследований, проведенных ведущими в области бурения фирмами: «Атлас Копко» (Швеция), «Даймонд Боарт» (Бельгия) и «Кристенсен» (США) [14; 15].

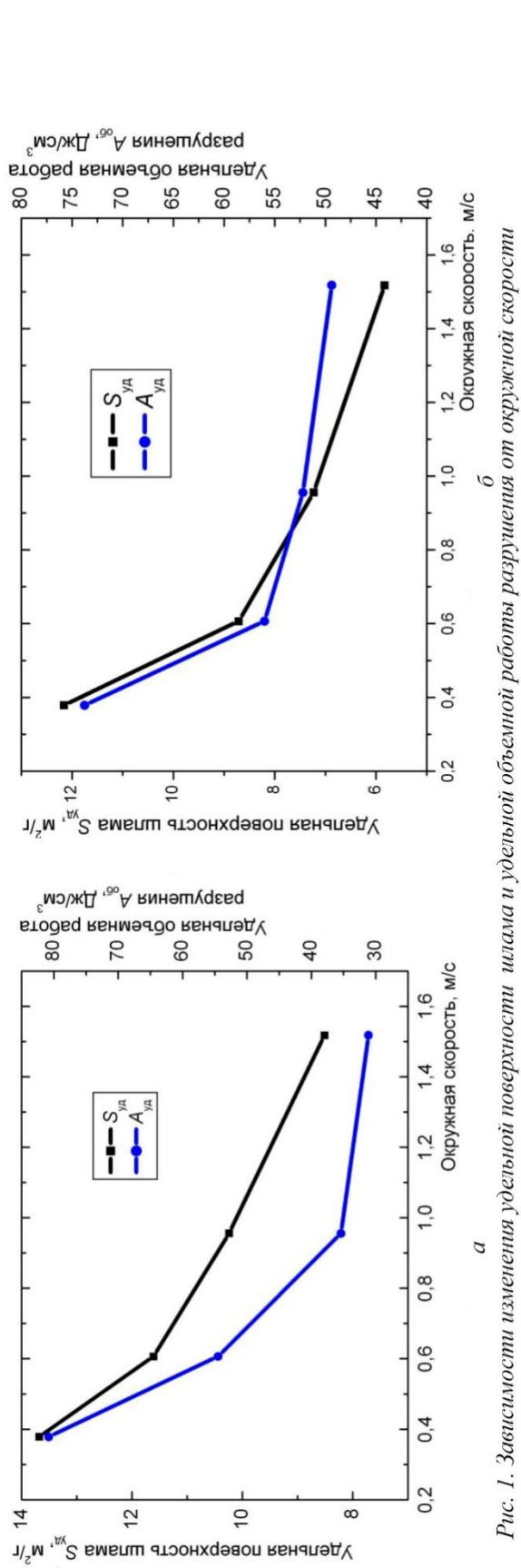


Рис. 1. Зависимости изменения удельной поверхности шлама и удельной объемной работы разрушения от окружной скорости вращения буровой коронки диаметром 36 мм при углублении за оборот:  $a - 63$  мкм;  $б - 80$  мкм

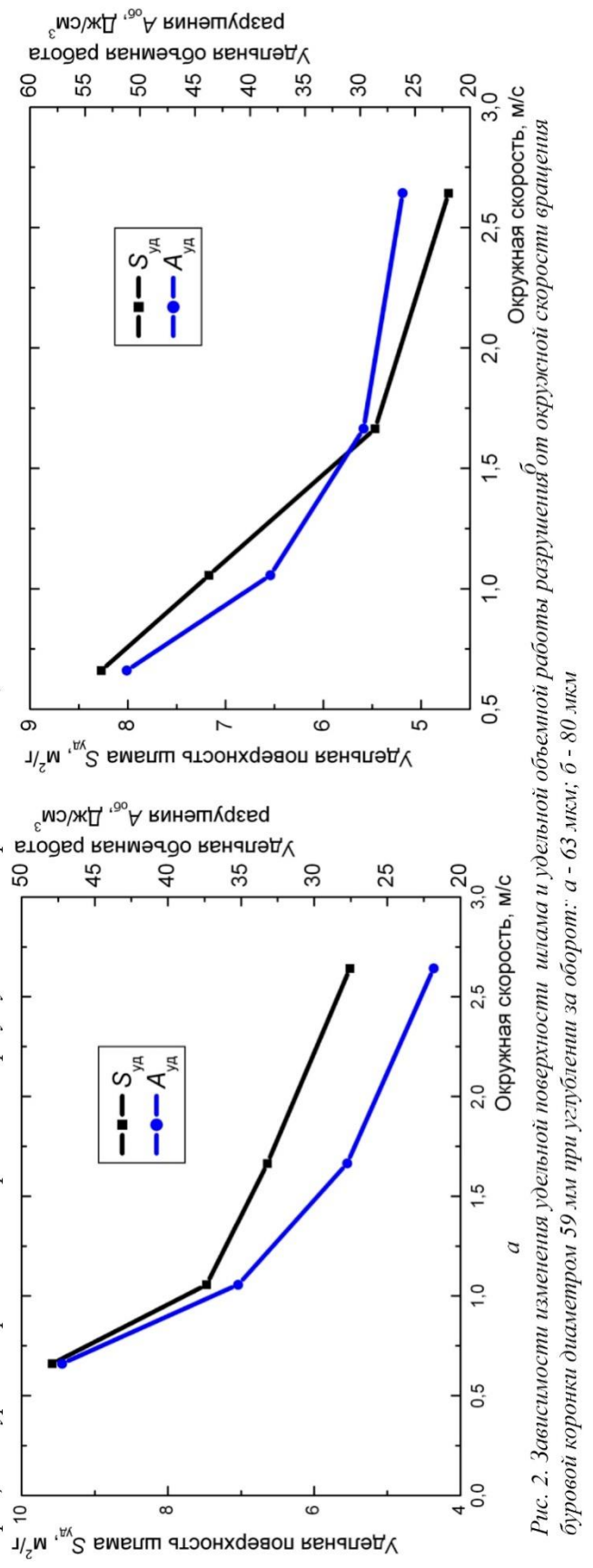


Рис. 2. Зависимости изменения удельной поверхности шлама и удельной объемной работы разрушения от окружной скорости вращения буровой коронки диаметром 59 мм при углублении за оборот:  $a - 63$  мкм;  $б - 80$  мкм

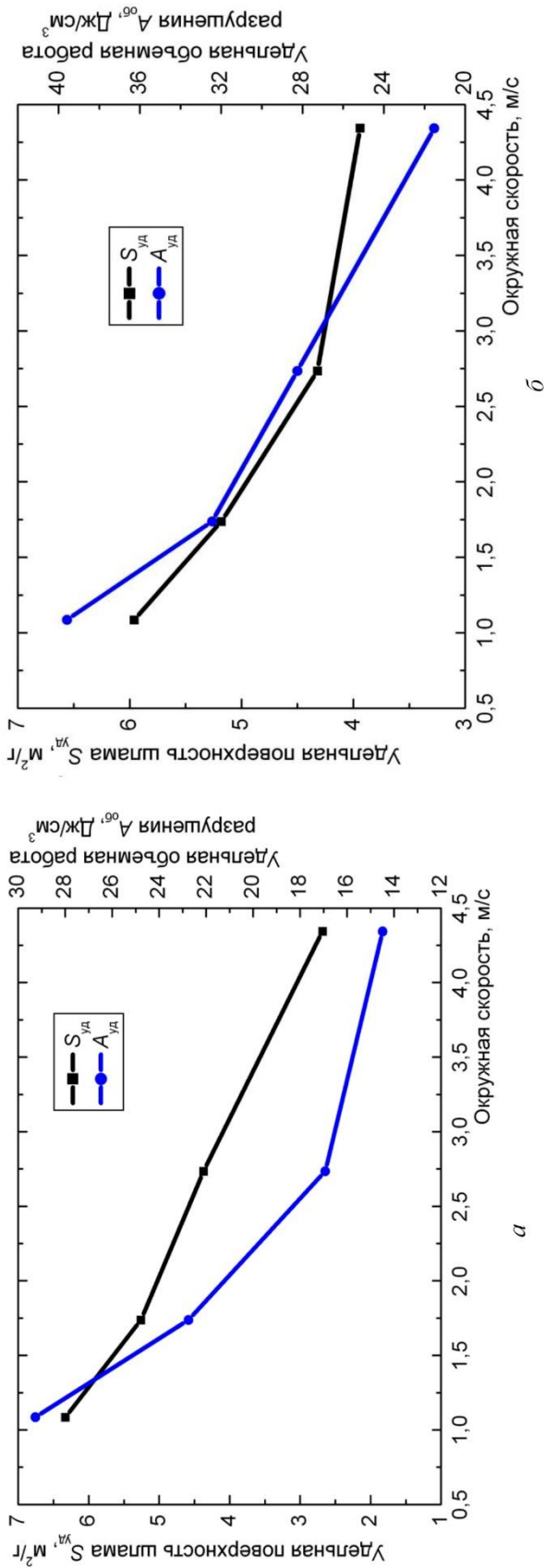


Рис. 3. Зависимости изменения удельной поверхности шлама и удельной объемной работы разрушения от окружной скорости вращении буровой коронки диаметром 93 мм при углублении за оборот: а - 63 мкм; б - 80 мкм

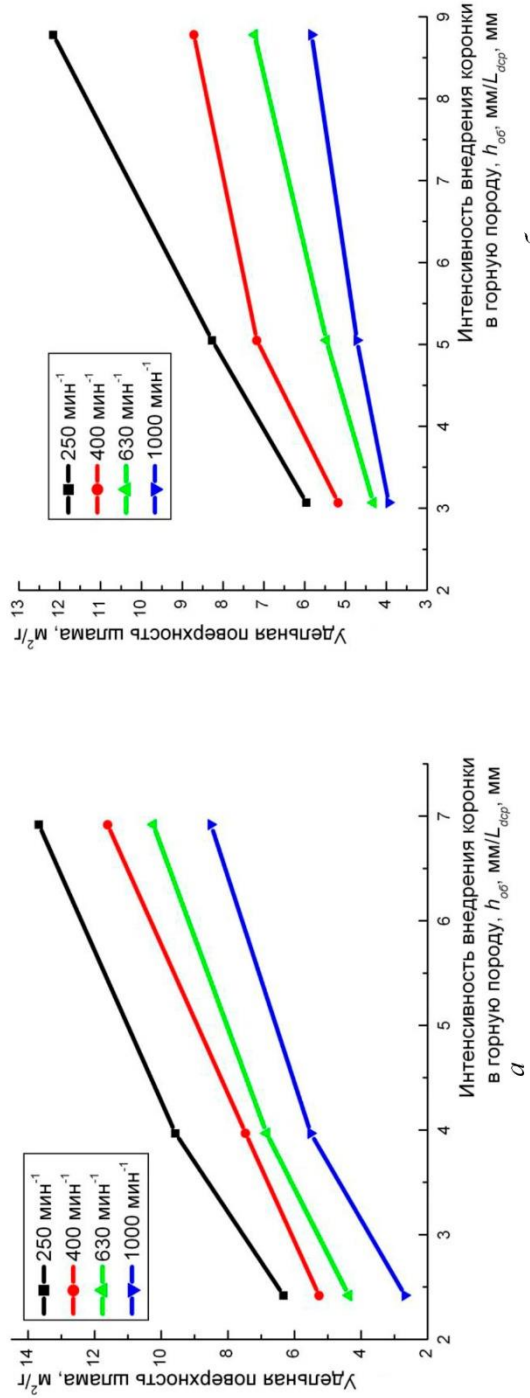


Рис. 4. Зависимости изменения удельной поверхности шлама от интенсивности внедрения в горную породу буровой коронки при углублении за оборот: а - 63 мкм; б - 80 мкм

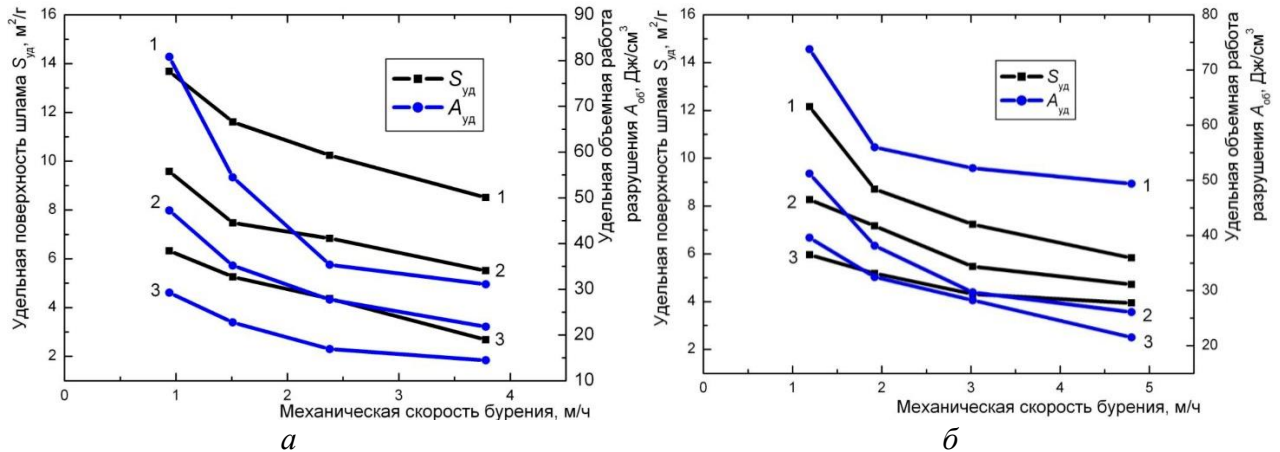


Рис. 5. Зависимость изменения удельной поверхности шлама (а) и удельной объемной работы разрушения (б) от механической скорости бурения коронкой диаметром: 1 – 36 мм; 2 – 59 мм; 3 – 93 мм

Увеличение выступления алмазов из матрицы обеспечивает достаточный зазор между забоем скважины и матрицей коронки для снижения степени дополнительного дробления отделившихся от забоя скважины крупных частиц шлама и их эффективного удаления промывочной жидкостью с призабойного пространства.

Всё это в комплексе вследствие снижения сил трения с уменьшением контактных нагрузок на рабочем торце инструмента может привести к более эффективному использованию подводимой к породоразрушающему инструменту энергии и снижению интенсивности его изнашивания.

С учетом изложенного следующий этап исследований состоял в изучении эффективного использования подводимой к коронке энергии при бурении с постоянной скоростью, обеспеченной различным сочетанием скорости вращения и углубления коронки за оборот. При этом механическая скорость бурения Коростышевского гранита поддерживалась постоянной и составляла 1,62 м/ч на парных сочетаниях режимов бурения. Результаты испытаний приведены в таблице.

### Результаты испытаний буровых коронок диаметром 46 мм при различной интенсивности разрушения горной породы

№ п/п	Скорость вращения, мин <sup>-1</sup>	Углубление коронки за оборот, мкм	Окружная скорость, м/с	Удельная объемная работа разрушения, Дж/см <sup>3</sup>	Удельная поверхность шлама, м <sup>2</sup> /г	Концентрация шлама под торцом коронки, %	Высота выступления алмазов, мкм	Интенсивность изнашивания, ×10 <sup>-5</sup> мм/м	Удельное давление на рабочем торце коронки, даН/см <sup>2</sup>
1	375	72	0,75	61,8	10,04	97	53	0,307	229,5
2	475	57	0,96	38,2	6,85	75	64	0,166	196,7
3	600	45	1,21	30,6	5,26	56	72	0,117	156,1
4	900	30	1,81	28,4	4,85	45	78	0,095	134,6



Результаты анализа приведенных в таблице данных исследования показали, что с увеличением углубления коронки за оборот с 30 до 57 мкм удельное давление на рабочем торце коронки и удельная объемная работа разрушения увеличились незначительно.

Наибольшие удельные контактные нагрузки на рабочем торце регистрировали у коронок, работавших при сочетании максимального из исследованных углубления за оборот 72 мкм и минимальной из исследованных скорости вращения 375 мин<sup>-1</sup>. При этом на поверхности рабочего торца коронки наблюдали множество разрушенных алмазных зерен со сколотыми вершинами, что приводило к снижению средней высоты выступания алмазов из матрицы. При наибольшем объеме разрушения горной породы и высокой концентрации шлама в призабойной зоне он дополнительно переизмельчается, о чем свидетельствует резкое увеличение его удельной поверхности. Повышение удельного давления и сил трения способствует нерациональному увеличению удельной работы разрушения и существенному повышению интенсивности изнашивания.

Для коронок, работавших с такой же механической скоростью бурения, но при более высокой скорости вращения 600 мин<sup>-1</sup> и более низком углублении за оборот 45 мкм снижался объем разрушаемой за оборот горной породы. Это приводило к уменьшению удельных контактных нагрузок на рабочий торец коронки и удельной объемной работы разрушения горной породы. Несмотря на еще высокую концентрацию шлама разрушенной горной породы в призабойной контактной зоне – 75%, с увеличением выступания алмазов из матрицы снижалась степень вторичного дробления образующегося шлама и уменьшалась удельная поверхность его частиц. При этом снижалось негативное абразивное воздействие крупных частиц шлама на матрицу коронки и интенсивность изнашивания инструмента увеличивалась незначительно.

При дальнейшем увеличении скорости вращения до 900 мин<sup>-1</sup> и уменьшении углубления за оборот до 30 мкм тенденция повышения работоспособности буровых коронок прослеживалась еще более очевидно. Удельная контактная нагрузка на рабочий торец коронки снизилась в 1,7 раза. Это привело к тому, что интенсивность изнашивания коронок снизилась в 3,2 раза.

Таким образом, приведенные результаты исследований износостойкости импрегнированных буровых коронок показали возможность дальнейшего повышения эффективности разрушения горной породы и снижения износа при обеспечении высокой скорости вращения породоразрушающего инструмента с одновременным снижением осевых нагрузок.

*Наведено результати досліджень впливу швидкості обертання та інтенсивності впровадження алмазних бурових коронок у гірську породу на ефективність її руйнування. Показано, що з підвищенням швидкості обертання алмазної бурової коронки і зниженням інтенсивності її впровадження в гірську породу знижується енергомісткість її руйнування та підвищується зносостійкість інструменту.*

**Ключові слова:** шлам гірської породи, синтетичні алмази, енергомісткість руйнування, зносостійкість, бурові коронки.

#### **EFFICIENCY OF THE USE OF DIAMOND DRILLING BITS WITH A DIFFERENT INTENSITY OF THE DESTRUCTION OF THE MOUNTAIN ROCKS**

*The results of studies of the effect of rotation speed and the intensity of introduction of diamond drill bits into rock on the efficiency of its fracture are presented. It is shown that an increase in the rotational speed of a diamond drill bit and a decrease in the intensity of its introduction into the rock contribute to a reduction in the energy intensity of its fracture and an increase in the wear resistance of the tool.*

**Key words:** rock slurry, synthetic diamonds, energy intensity of destruction, wear resistance, drill bit.

### Литература

1. Ребиндер П. А. Исследование процессов образования дисперсных структур. – Минск: Наука и техника, 1971. – 331 с.
2. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
3. Шрейнер А. А. Физические основы механики горных пород. – М.: Госкомтехиздат, 1950. – 211 с.
4. Спивак А. И. Механика горных пород. – М.: Недра, 1967. – 192 с.
5. Присташ В. В., Чирков С. Е. Энергоемкость разрушения горных пород при различных видах механических воздействий // Горн. информ.–аналит. бюл. – М.: Горная кн., 2000. – 10. – С. 85–87.
6. Констандов Ю. А. Влияние параметров динамического воздействия на разрушение горных пород // Динамические системы. – 2008. – Вып. 24. – С. 121–131.
7. Ребиндер П. А. Исследование процессов образования дисперсных структур. – Минск: Наука и техника, 1971. – 331 с.
8. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
9. Ходаков Г. С. Физика измельчения. – М.: Наука, 1972. – 307 с.
10. Грег. С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – М.: Мир, 1970. – 408 с.
11. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении / Под ред. В. Н. Бакуля. – К.: Наук. думка. 1978. – 232 с.
12. Измерение удельной поверхности порошковых материалов и построение изотермы адсорбции–десорбции на приборе «Акусорб» фирмы «Культреникс». – К.: ИСМ АН УССР, 1985. – 13 с.
13. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном инструменте / Р. К. Богданов, А. П. Загора, А. М. Исонкин и др. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. – 138 с.
14. Craelius Diabor's new test drilling rig. // Industrial Diamond Rev. – 1971. – N 4. – P. 142–143.
15. Техника и технология высокоскоростного бурения / Г. Л. Блинов, Л. Г. Буркин, О. А. Володин и др. – М.: Недра, 1982. – 408 с.

Поступила 26.04.2017

УДК 622.24

**А. А. Кожевников**, д-р техн. наук<sup>1</sup>; **А. Ю. Дреус**<sup>2</sup>, **Б. Ли**<sup>3</sup>, кандидаты технических наук

<sup>1</sup>Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,  
г. Днепр, Украина

<sup>2</sup>Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Украина

<sup>3</sup>Строительный колледж Университета провинции Цзилинь, г. Чанчунь, Китай

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ С ПРЕРЫВИСТОЙ ПОМЫВКОЙ

Предложен подход к определению эффективности прерывистой промывки при алмазном бурении, учитывающий влияние тепловой энергии трения на забое скважины.

**Ключевые слова:** алмазное бурение, энергетический критерий эффективности, импульсная промывка.