

УДК 622.024

**А. М. Исонкин, Р. К. Богданов, А. П. Закора**, кандидаты техн. наук

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

### **СВЯЗЬ ИЗНОСА АЛМАЗНЫХ ИМПРЕГНИРОВАННЫХ БУРОВЫХ КОРОНОК С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ**

*The durability analysis of impregnated drill bits has been presented for different rock failure intensities. The variation of rock failure intensity is attainable by changing the correlation between the rotational speed and the axial load.*

Анализ данных о перспективах развития техники геологоразведочного бурения говорит о том, что алмазное бурение на ближайшее время останется одним из основных технологических методов геологической разведки месторождений полезных ископаемых. При этом совершенствование технологии алмазного бурения направлено на повышение частоты вращения бурового снаряда и внедрение нового, более мощного бурового оборудования, обеспечивающего бесступенчатое регулирование частоты вращения.

Одним из основных параметров, определяющих уровень технологии и техники алмазного бурения, является окружная скорость породоразрушающего инструмента. О больших перспективах повышения данного параметра можно судить по результатам исследований, проведенных ведущими в области бурения фирмами: «Atlas Copco» (Швеция), «Diamond Boart» (Бельгия) и «Christensen» (США) [1].

Однако влияние окружных скоростей на показатели бурения не может рассматриваться в отрыве от такого параметра, как осевая нагрузка на инструмент. Известно, что её повышение до определенного предела сопровождается ростом механической скорости бурения. При дальнейшем повышении осевой нагрузки механическая скорость уменьшается, а износ коронок резко увеличивается в связи с нарушением режима охлаждения их рабочего торца [2].

Комплексным показателем, отражающим эффективность разрушения породы под влиянием осевой нагрузки и частоты вращения, является величина углубки за один оборот. Этот показатель может служить критерием оптимизации параметров режима бурения. При этом поиск рационального значения соотношения осевой нагрузки и частоты вращения (окружной скорости) должен вестись в пределах технических параметров, обеспечиваемых используемым буровым оборудованием, и предельно допустимой для данной горной породы углубки за один оборот.

Необходимая механическая скорость бурения алмазным породоразрушающим инструментом может быть достигнута при различном парном сочетании таких основных режимных параметров, как частота вращения  $n$  и осевая нагрузка  $P$ . При этом на каждом из сочетаний  $n$  и  $P$  обеспечивается определенная интенсивность разрушения горной породы, которая определяется объемом разрушенной породы за единицу времени.

При работе буровой коронки алмазные зерна создают на её рабочем торце прерывистую режущую кромку. Несмотря на различную степень обнажения алмазов на рабочей поверхности, максимальная и средняя высота их выступания из матрицы существенно зависят от качества алмазного сырья, режимов бурения и физико-механических свойств разрушаемой горной породы.

Работоспособность алмазов при вращательном бурении в значительной степени обусловлена возможностью выдерживать высокие изгибающие напряжения. Изгибающие напряжения, испытываемые единичным алмазным зерном при внедрении его в породу под действием осевой нагрузки и вращательном движении по поверхности полупространства забоя скважины, выразим в виде

$$S_u = \frac{M_u}{W}, \quad (1)$$

где  $M_u$  – изгибающий момент, действующий на единичный алмазный резец, Н/м;  
 $W$  – момент сопротивления, м<sup>3</sup>; при этом  $M_u$  определим, согласно выражению:

$$M_u = \frac{f_T P_{oc} R_{cp}}{n_s S_k Z_a}, \quad (2)$$

где:  $f_T$  – коэффициент трения алмаза о породу;

$P_{oc}$  – осевая нагрузка, Н;

$R_{cp}$  – средний радиус буровой коронки, м;

$Z_a$  – коэффициент, учитывающий количество активных зерен алмазов, выступающих из матрицы и разрушающих породу:  $Z_a = 0,17 - 0,20$ ;

$n_s$  – количество алмазов на единице рабочей площади буровой коронки, шт./см<sup>2</sup>;

$S_k$  – площадь рабочего торца коронки, см<sup>2</sup>.

Составная часть выражения (2)

$$\frac{P_{oc}}{n_s S_k Z_a} = P_a \quad (3)$$

представляет собой осевую нагрузку  $P_a$ , которую следует приложить к единичному алмазу, чтобы внедрить его в породу на глубину  $h_a$ .

Выражение для определения нагрузки  $P_a$  имеет вид

$$P_a = \frac{D_a h_a}{2,12q} \sqrt{\left(1 - \frac{2h_a}{D_a}\right) \frac{S_p}{E}}, \quad (4)$$

где:  $D_a$  – диаметр алмазного зерна, мм;

$h_a$  – глубина внедрения алмазного зерна в горную породу, мм;

$q$  – константа породы,  $q = \frac{1-n^2}{E}$ , мм<sup>2</sup>/Н;

$n$  – коэффициент Пуассона;

$S_p$  – предел прочности породы на растяжение, Па;

$E$  – модуль упругости породы, Па.

Заменив (3) на (4) в (2), получим

$$M_u = \frac{f_T R_{cp} D_a h_a}{2,12q} \sqrt{\left(1 - \frac{2h_a}{D_a}\right) \frac{S_p}{E}}. \quad (5)$$

Сделаем допущение, что сфера – основная форма алмазов в буровой коронке. С учетом этого величину момента сопротивления  $W$  алмазного зерна с максимальной высотой выступания  $H_{ам}$  определим как

$$W = \frac{J_x}{H_{ам}} = \frac{p D_a^4}{64 H_{ам}}, \quad (6)$$

где:  $J_x$  – момент инерции, мм<sup>4</sup>.

Подставив (5) и (6) в (1), получим

$$s_u = \frac{30,2 f_T R_{cp} h_a H_{ам}}{p D_a^3 q} \sqrt{\left(1 - \frac{2h_a}{D_a}\right) \frac{s p}{E}}. \quad (7)$$

Согласно (2), предел прочности алмазов на изгиб (за исключением случаев скалывания алмазов при разрушении породы) не должен превышать

$$s_u \leq y s_\sigma \leq \frac{P_{рн} K_{ТП}}{S_{аз}} \leq \frac{4y P_{рн} K_{ТП}}{p D_a^2}, \quad (8)$$

где:  $y$  – коэффициент взаимосвязи пределов прочности на изгиб и сжатие,  $y = 0,1 - 0,25$ ;

$s_\sigma$  – предел прочности алмаза на сжатие, Па;

$P_{рн}$  – разрушающая нагрузка на алмазное зерно, Н;

$S_{аз}$  – площадь поперечного сечения алмазного зерна, м<sup>2</sup>;

$K_{ТП}$  – коэффициент термочувствительности синтетических алмазов:

$$K_{ТП} = \frac{P_{рн}(T_u^\circ)}{P_{рн}(T_{oc}^\circ)}, \quad (9)$$

где:  $P_{рн}(T_u^\circ)$   $\frac{3}{4}$  разрушающая нагрузка на алмазное зерно после его нагрева до температуры изготовления коронки, Н;

$P_{рн}(T_{oc}^\circ)$  – разрушающая нагрузка на алмазное зерно, не подвергавшееся нагреву (при комнатной температуре  $T_{oc}^\circ$ ) Н.

Приравняв (7) и (8), после преобразования получим выражения для определения предельной максимальной высоты выступания алмазов из матрицы

$$H_{ам} \leq \frac{y P_{рн} K_{ТП} D_a q}{7,55 f_T R_{cp} h_a \sqrt{\left(1 - \frac{2h_a}{D_a}\right) \frac{s p}{E}}}. \quad (10)$$

Из (10) видно, что максимальная высота выступания алмазов зависит от их прочности и размера. Этот показатель обратно пропорционален глубине внедрения  $h_a$ , зависящей от физико-механических свойств разрушаемой породы и осевой нагрузки на коронку.

При определении глубины  $h_a$  внедрения единичного алмазного зерна в породу примем во внимание необходимость поддерживать в процессе бурения объемное разрушение породы

$$P_a \geq P_{и} S_{ка} \quad (11)$$

где:  $P_a$  – нагрузка на единичное алмазное зерно, Н;

$P_{и}$  – твердость породы, Н/см<sup>2</sup>;

$S_{ка}$  – площадь контакта алмаза с породой при ее разрушении, м<sup>2</sup>.

Поскольку при вращении коронки на забое скважины алмазы контактируют с породой только частью поверхности передней полусферы, величину  $S_{ка}$  выразим в виде:

$$S_{ka} = p R_a h_a \quad (12)$$

где  $R_a$  – радиус алмазного зерна, мм.

Подставляя (3) и (2) в (8), после преобразований получим

$$h_a = \frac{2 P_{oc}}{P_{ul} p D_a \left(4,4 m K \cdot 10^{-2}\right)^{2/3} S_k Z_a} \cdot \quad (13)$$

Из (13) видно, что глубина внедрения алмаза в породу зависит от осевой нагрузки на коронку, физико-механических свойств породы (твердость по штампу), зернистости ( $m$ ) и концентрации алмазов в матрице ( $K$ ).

Анализ выражений (10) и (13) выявил общую закономерность влияния осевой нагрузки как силового параметра, увеличение которого, с одной стороны, способствует повышению эффективности разрушения породы, а с другой – росту удельных контактных нагрузок, тангенциальной составляющей, а также снижению выступания алмазов из матрицы.

С учетом вышеизложенного, основной целью проведенных нами исследований являлось изучение влияния парного сочетания частоты вращения и осевой нагрузки на работоспособность буровой коронки в условиях обеспечения равной механической скорости бурения при различной величине углубки коронки за один оборот. Можно сделать предположение, что при увеличении интенсивности разрушения за счет снижения частоты вращения и повышения осевой нагрузки возрастает углубка коронки за один оборот. Это приводит в свою очередь к увеличению объема разрушенной горной породы, росту концентрации частиц шлама в призабойной зоне и количества их контактов с рабочей поверхностью матрицы коронки. Всё это в комплексе с увеличением контактных нагрузок на рабочем торце инструмента может привести к росту интенсивности изнашивания матрицы буровой коронки.

С целью подтверждения данного предположения были проведены экспериментальные исследования разрушения коростышевского гранита импрегнированными буровыми коронками типа БС-01 диаметром 46 мм, оснащенными синтетическими алмазами марки АС125 зернистостью 315/250. В процессе проведения экспериментов механическая скорость бурения коростышевского гранита поддерживалась постоянной и составляла 1,62 м/ч на парных сочетаниях режимов бурения. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Эффективность разрушения горной породы оценивалась по величине работы трения. Критерием износостойкости служила интенсивность изнашивания матрицы буровой коронки. Величина осевой нагрузки и тангенциальной составляющей усилия разрушения горной породы определялись с помощью двухкомпонентного динамометра, подключенного через тензоусилитель УТ-1 к осцилографу Н-117.

Вместе с энергетическими параметрами контакта буровой коронки с горной породой при различных режимах бурения оценивалось состояние режущей способности рабочей поверхности инструмента. В качестве параметра, оценивающего микрогеометрию рабочей поверхности матрицы буровой коронки, была принята высота выступания алмазов. Для измерения этого показателя применялась специально разработанная методика, предусматривающая использование возможностей растрового электронного микроскопа-микрoанализатора «САМСКАН - 4DV».

Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Анализ результатов исследований показал, что при постоянной механической скорости бурения увеличение частоты вращения породоразрушающего инструмента с одновременным уменьшением осевой нагрузки приводит к значительному снижению интенсивности разрушения горных пород, а также удельных контактных нагрузок на рабочем торце коронки. Как следствие, снизилась работа трения и тангенциальная составляющая усилия разрушения горной породы.

Исследования рабочей поверхности буровых коронок, работавших при разной интенсивности разрушения горной породы, обусловленной различной величиной углубки за оборот, показали следующее.

Наибольшая величина интенсивности разрушения горных пород, а также удельных контактных нагрузок на рабочем торце и тангенциальной составляющей усилия разрушения горной породы отмечается у коронок, работавших при сочетании максимальной углубки за оборот ( $h=72 \cdot 10^{-6}$  м) и минимальной частоте вращения ( $n=375$  мин<sup>-1</sup>). В этом режиме на поверхности рабочего торца алмазных коронок наблюдается большое количество разрушенных алмазных зерен со сколотыми вершинами (рис. 1).

Как следствие, они имеют наименьшую среднюю высоту выступания алмазов из матрицы, что при наибольшем объёме разрушения горной породы приводит к снижению режущей способности коронок и повышению интенсивности их изнашивания.

Для коронок, работавших с той же механической скоростью бурения, но при более высокой частоте вращения ( $n=600$  мин<sup>-1</sup>) и более низкой углубке за оборот ( $h=45 \cdot 10^{-6}$  м) снижается интенсивность разрушения горной породы. Это приводит к уменьшению удельных контактных нагрузок на рабочий торец коронки и тангенциальной составляющей усилия разрушения горной породы. Как следствие, состояние рабочей поверхности улучшается, о чем свидетельствует снижение на рабочей поверхности коронки количества разрушенных зерен алмазов и увеличение средней высоты их выступания в 1,54 раза (рис. 2).

При дальнейшем увеличении частоты вращения до  $n=900$  мин<sup>-1</sup> и снижении углубки за оборот до  $h=30 \cdot 10^{-6}$  м тенденция улучшения работоспособности буровых коронок прослеживалась ещё более очевидно. Интенсивность разрушения породы снизилась в 2,4 раза, а удельные контактные нагрузки на рабочий торец коронки снизились в 1,7 раза. Это привело к тому, что средняя высота выступания алмазов по сравнению с самым тяжелым режимом бурения ( $h=72 \cdot 10^{-6}$  м,  $n=375$  мин<sup>-1</sup>) возросла в 1,64 раза, а интенсивность изнашивания коронок снизилась более чем в 3,2 раза.

#### **Выводы**

1. В результате проведенных исследований установлена взаимосвязь между интенсивностью изнашивания алмазных коронок и интенсивностью разрушения ими горных пород. С увеличением интенсивности разрушения горных пород интенсивность изнашивания алмазных буровых коронок увеличивается.

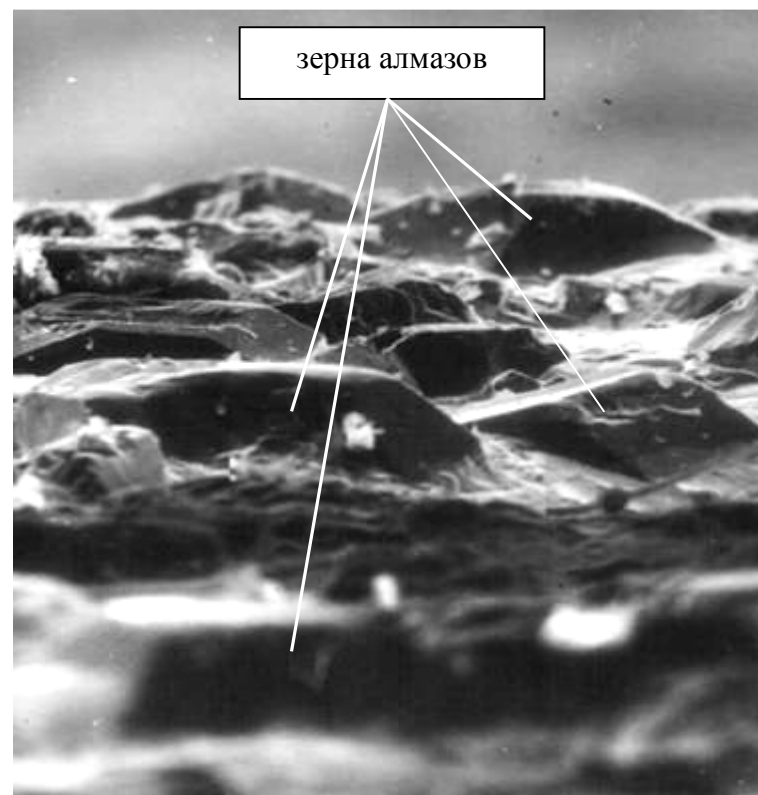
2. Регулировать интенсивность изнашивания алмазных буровых коронок и интенсивность разрушения ими горных пород возможно с помощью изменения параметров режима бурения, и, как следствие, изменением углубки за оборот. Так, увеличение частоты вращения в 2,4 раза и снижение при этом нагрузки в 1,7 раза приводит к снижению интенсивности изнашивания алмазной коронки в 3,2 раза при снижении интенсивности разрушения горной породы в 2,4 раза.

**Показатели работы алмазных буровых коронок при различных частотах вращения инструмента**

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Углубка коронки за один оборот, м·10 <sup>-6</sup>	Интенсивность разрушения породы, см <sup>3</sup> /мин	Механическая скорость бурения, м/ч	Окружная скорость, м/с	Осевая нагрузка, даН	Тангенциальная составляющая, даН	Работа трения, Дж·10 <sup>8</sup>	Удельное давление на рабочем торце коронки, даН/см <sup>2</sup>	Интенсивность изнашивания, мм/м·10 <sup>-5</sup>	Средняя высота выступа алмазов из матрицы, мкм	Проходка на коронку при высоте алмазного слоя 4 мм, м
375	72	3,9	1,620	0,75	840	294	8,846	229,5	0,307	53	13
475	57	3,1	1,624	0,96	720	216	8,447	196,7	0,166	74	24
600	45	2,5	1,620	1,21	570	154	8,175	156,1	0,117	82	34
900	30	1,6	1,620	1,81	490	118	7,803	134,6	0,095	87	42



*Рис. 1. Вид участка рабочей поверхности импрегнированной коронки со сколотыми вершинами алмазных зерен.*



*Рис. 2. Вид участка рабочей поверхности импрегнированной коронки алмазными зернами, работавшими при высокой частоте вращения и величине углубки за оборот.*

**Литература**

1. Блинов Г. Л., Буркин Л. Г., Володин О. А. и др./ Техника и технология высокоскоростного бурения. – М.: Недра, 1982. – 408 с.
2. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин: Справочник / Н. И. Корнилов, В. С. Травкин, Л. К. Берестень и др. – М.: Недра, 1979. – 359 с.

*Поступила 04.07.07.*