Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова,
т. LIV, вып. 1, 1967 г.

УДК 622.24.082

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД МЕЛКОАЛМАЗНЫМИ КОРОНКАМИ

С. Н. Тараканов

Освоение алмазных месторождений Якутии и производство синтетических алмазов привлекают внимание специалистов к возможности более широкого применения алмазных коронок для бурения разведочно-эксплуатационных и взрывных скважин-шпуров, особенно в очень твердых породах.

Настоящая статья посвящена исследованию работы мелкоалмазной кольцевой коронки как наиболее экономичной при разрушении очень твердых горных пород.

В практике широко используются два основных конструктивных типа таких коронок: импрегнированные и однослойные. В импрегнированной коронке алмазы равномерно распределены в пространстве, занимаемом матрицей. Такое расположение алмазов обеспечивает самозатачиваемость коронки при бурении с постоянной осевой нагрузкой на забой. Однослойная коронка имеет общее затупление, вызываемое увеличением поверхности обнажения алмазов по мере их износа. Поэтому бурение такой коронкой производится с принудительной подачей, осуществляемой непрерывным повышением осевой нагрузки на забой. Это позволяет сохранять режущую способность коронки и поддерживать скорость проходки постоянной.

На рисунке схематически показана качественная зависимость механической скорости проходки от осевой нагрузки на забой $v_м = \psi(C)$. Линейный участок кривой, определяемый значениями нагрузок C_1 и C_2, условно можно считать общим для обоих типов коронок. На этом участке скорость проходки и нагрузка на забой связаны прямо пропорциональной зависимостью. Изменение осевой нагрузки от C_2 до C_3 соответствует однослойной коронке при бурении с принудительной подачей. На этом участке кривой увеличение нагрузки не приводит к возрастанию скорости проходки. Следовательно, нагрузка C_2 определяет наибольшее возможное значение скорости проходки для любого типа коронки.

Конструктивное различие коронок не может служить препятствием при разработке общей теории работы мелкоалмазной коронки на забое. Основным в процессах разрушения породы мелкоалмазными коронками является взаимодействие шероховатого торца коронки с менее шероховатой поверхностью — породой на забое, в результате которого порода разрушается с постоянной, независимой от времени, скоростью проходки.

Механизм взаимодействия резцов с породой. Торец коронки относится к классу грубых шероховатых поверхностей, которые характеризуются линейным распределением выступов шероховатости по высоте. Выступами шероховатости (элементарными резцами) являются неровности на рабочей поверхности алмазов, непрерывно образующиеся при износе ярко выраженного дискретного характера (вследствие совершенной спайности светлых технических алмазов), а также единичные, очень мелкие алмазы. Элементарные резцы, разрушающие породу, обладают естественной приостренной

формой, которая придает им необходимую механическую прочность, облегчает внедрение в породу и в то же время ограничивает глубину внедрения.

При постановке коронки на забой (без вращения) и нагружении ее осевой силой C, $кГ$, алмазные резцы внедрятся в породу, образуя с ней контакт в основном пластического характера. Полная площадь пластического контакта будет состоять из ряда контактов. Ее можно определить из отношения

$$S_к = \frac{C}{p}, \tag{1}$$

где p — твердость породы по Л. А. Шрейнеру, $кГ/мм^2$.

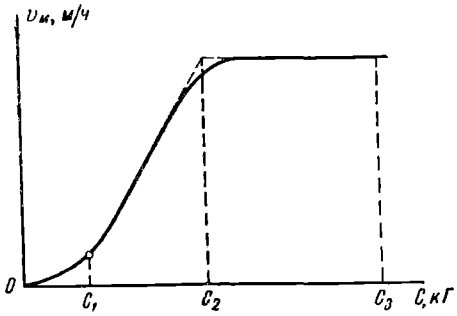
При средней площади единичного контакта s_0 общее число пластических контактов

$$M = \frac{S_к}{s_0} = \frac{C}{ps_0} = \frac{C}{c_i}, \tag{2}$$

где $c_i = s_0 p$ — среднее осевое усилие на один контакт, $кГ$

При линейном распределении элементарных резцов по высоте число пластических контактов, через которое передается осевая нагрузка на забой, зависит от сближения торца коронки с забоем.

Если осевая нагрузка одна и та же в породах различной твердости, то сближение будет меньше в более твердой породе вследствие большого сопротивления породы внедрению резцов. В этом случае нагрузка будет передаваться на забой через меньшее число контактов. Поэтому среднее осевое усилие, приходящееся на один контакт $c_i = s_0 p$, будет контролироваться твердостью и возрастать прямо пропорционально твердости породы.



Зависимость механической скорости проходки от осевой нагрузки на забой $v_м = \psi(C)$.

Таким образом, средняя площадь единичного контакта s_0, входящая в выражение (2), не зависит от твердости породы. Ей геометрически соответствует средняя глубина разрушения h_0 (исчисленная для группы резцов), которая, как и s_0, окажется независимой от твердости породы.

При бурении в одной и той же породе с увеличением осевой нагрузки на забой число пластических контактов повышается. Примем на линейном участке зависимости $v_м = \psi(C)$ число пластических контактов линейно связанным с осевой нагрузкой на забой при сохранении средней глубины разрушения h_0, постоянной для данного типа коронки.

Таким образом, в принимаемой модели механизма взаимодействия резцов с породой изменение твердости породы, осевой нагрузки на забой (в определенном интервале) вызывает только изменение числа пластических контактов, которое принимается за число одновременно работающих резцов. При этом средняя глубина разрушения h_0, определенная для конкретного типа коронки, не зависит ни от твердости породы, ни от осевой нагрузки на забой.

Скорость проходки без учета износа и притупления резцов. Эту скорость проходки можно определить по известной формуле

$$v_0 = h_0 m_0 n, \tag{3}$$

где h_0 — глубина разрушения, $мм$; m_0 — число контактов (резцов), отнесенное к средней окружности коронки; n — число оборотов коронки в 1 $мин$·

Величину m_0 устанавливаем из выражения

$$M = m_0 \frac{b}{l_0}, \tag{4}$$

где b — ширина торца коронки, *мм*; l_0 — длинная сторона контактной площади s_0, имитирующая длину лезвия резца, ориентированного по ширине кольцевого кольца, *мм*.

Отсюда

$$m_0 = M \frac{l_0}{b} = \frac{C}{ps_0} \frac{l_0}{b}. \tag{5}$$

Подставляя m_0 в выражение (3), получаем

$$v_0 = \frac{h_0 l_0}{s_0} \cdot \frac{Cn}{bp}. \tag{6}$$

Заменим в формуле (6) величину h_0 выражением Е. Ф. Эпштейна [1939] и Л. А. Шрейнера [1958]

$$h_0 = \frac{C_i}{ap 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} l_0},$$

где p — твердость по Л. А. Шрейнеру, *кГ/мм²*; ap — твердость по Е. Ф. Эпштейну, *кГ/мм²*, $a = \frac{h_к}{h_0} < 1$ — отношение истинной глубины внедрения резца в породу $h_к$ к полной глубине разрушения h_0; α — симметричный угол приострения алмаза.

После подстановки

$$v_0 = \frac{Cn}{ap\, 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} b}. \tag{7}$$

Эта формула, хорошо известная из теории твердосплавного бурения, получена в предположении независимости средней глубины разрушения h_0 от твердости породы. Она не учитывает влияние износа и притупления элементарных резцов в процессе бурения, поэтому справедлива только для случая, когда износом резцов ввиду его малости можно пренебречь. В дальнейшем скорость проходки v_0 будем называть начальной, а скорость проходки, полученную с учетом износа и затупления, — средней $v_м$.

Влияние износа и притупления резцов на скорость проходки. Интенсивность износа элементарного резца непосредственно связана с начальной нагрузкой на резец $c_i = s_0 p$, которая характеризует начальные условия работы резца при непосредственном разрушении породы и преодолении сил трения на контакте с породой. Поэтому для более полной характеристики износа-разрушения элементарного резца можно воспользоваться эмпирическим законом Амонтона, согласно которому сила трения при движении резца на забое, вызывающая износ (при $s_0 = \text{const}$),

$$F = \mu c_i = \mu s_0 p, \tag{8}$$

где μ — коэффициент трения.

Двойная зависимость силы трения от нагрузки c_i и твердости породы p обусловлена шероховатостью торца коронки, т. е. распределением осевой нагрузки на забой между элементарными резцами в соответствии с их высотой и формой.

Удельная сила трения, характеризующая интенсивность износа резца,

$$F_0 = \frac{F}{s_0} = \mu p. \tag{9}$$

На основании выражений (8) и (9) находим среднюю скорость линейного износа резца

$$i = \omega_0 \mu p \pi D n, \tag{10}$$

где ω_0 — коэффициент объемного износа алмазов, *мм³/кГ·мм*; πDn = линейная скорость коронки, *мм/мин*.

По данным исследования статистическое значение коэффициента трения μ при бурении полиминеральных пород не зависит от твердости. При этом условии интенсивность износа элементарного резца определяется твердостью пород. Сам по себе линейный износ резцов в установившемся процессе разрушения породы непрерывно заменяющимися элементарными резцами не может изменить общего вида зависимости скорости проходки от твердости, определяемого формулой (7). Действительно, представим среднюю механическую скорость проходки, учитывающую линейный износ резцов, в виде

$$v_м = \frac{Qm_0}{t_к}, \tag{11}$$

где Q — средняя проходка на один резец, *мм*; $t_к$ — конечное время работы (или жизни) одного резца, *мин*, $t_к = \frac{h_0}{i}$; $\frac{m_0}{t_к}$ — число сработавшихся резцов в единицу времени.

Выражая

$$Q = \frac{h_0 n t_к}{2} = \frac{h_0^2}{2i} n \tag{12}$$

и подставляя в формулу (11), получим

$$v_м = \frac{h_0 m_0 n}{2} = \frac{v_0}{2} = \frac{Cn}{2ap\,2\,\mathrm{tg}\,\frac{\alpha}{2}\,b}. \tag{13}$$

Отсюда видно, что в этом случае средняя скорость проходки отличалась бы от начальной, определяемой формулой (7), только постоянным коэффициентом ($^1/_2$).

Как показало изучение статистических материалов по алмазному и дробовому бурению, резанию горных пород абразивными дисками и др., средняя скорость проходки снижается при увеличении твердости разбуриваемых горных пород в большей степени, чем отражено формулами (7) и (13). Поэтому нами принято, что структурная прочность горной породы (твердость) влияет на степень притупления элементарных резцов, а притупление резцов, в свою очередь, на скорость проходки.

Из этого предположения следует, что элементарные резцы, разрушающие более твердую породу, имеют большую степень притупления. В результате среднее усилие, приходящееся на один контакт, возрастает и становится $c_z \geqslant c_i$.

При сохранении осевой нагрузки на забой притупление резцов снижает общее число пластических контактов и, следовательно, сокращает число контактов, до m, определяющего скорость проходки: $m \leqslant m_0$.

Оставшиеся в пластическом контакте с породой резцы, нагруженные бóльшим осевым усилием, разрушают породу, не испытывая отжатия от забоя, которое было бы неизбежным при работе затупляющихся резцов, нагруженных постоянным осевым усилием.

В соответствии с изложенным представим среднюю скорость проходки выражением

$$v_м = \frac{QN}{T}, \tag{14}$$

где N — число резцов, отнесенное к средней окружности коронки, израсходованное за длительное время бурения T.

Скорость проходки не зависит от времени, поэтому, приняв $T = t = 1$, приведем формулу (14) к виду

$$v_м = \frac{QR}{t}, \tag{15}$$

где $R = N\frac{t}{T}$ — число израсходованных элементарных резцов за время $t = 1$, отнесенное к средней окружности коронки.

Величина R всегда пропорциональна начальному числу резцов m_0. Поэтому

$$R = \gamma_0 m_0, \tag{16}$$

где $\gamma_0 > 0$ — коэффициент пропорциональности, возрастающий с повышением твердости породы.

$$t = \frac{Y}{i}, \tag{17}$$

где Y — линейный износ резца за время $t = 1$.

Учитывая, что оставшиеся в контакте с породой резцы разрушают породу, не испытывая отжатия от забоя, определим Q выражением (12) и, подставляя найденные значения Q, R и t в формулу (15), найдем

$$v_м = \gamma_0 \frac{h_0^2 m_0 n}{2Y} \tag{18}$$

при $Y > 0$.

Формула (18) в явном виде не содержит скорости линейного износа резца i. Это очень важно, так как эта величина в установившемся процессе разрушения не может влиять на среднюю скорость проходки. Она лишь характеризует скорость замены сработавшихся резцов новыми.

После подстановки в формулу (18) значений h_0 и m_0 из выражений (5) и (6) получаем

$$v_м = \frac{\gamma_0}{2} \cdot \frac{c_i}{s_э} \cdot \frac{1}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{Cn}{b (ap)^2}, \tag{19}$$

где $s_э$ — площадь затупления резца за время $t = 1$, $s_э = Y l_0 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$.

Формула (19) справедлива для твердых пород, при бурении которых глубина внедрения резца полностью контролируется твердостью породы. Для этих пород выполняется условие (8). Поэтому примем, что область существования функции (19) ограничена слева твердостью первой группы твердых пород p_0. Такие породы обладают значительной прочностью и их уже можно бурить дробью.

Представим отношение

$$\frac{c_i}{s_э} = \frac{s_0 a p_0}{s_{э0}} = \theta a p_0 \tag{20}$$

и запишем выражение (19) в виде

$$v_м = \frac{\gamma_0 \theta (a p_0)}{4 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{Cn}{b (ap)^2}, \tag{21}$$

где θ — безразмерный коэффициент, представляющий отношение $\frac{s_0}{s_{э0}}$.

При твердости пород $ap = ap_0$ формула (21) должна перейти в формулу (13). Из этого условия находим $\theta\gamma_0 = 1$. Окончательным выражением средней скорости проходки будет

$$v_м = \frac{p_0}{4a \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{Cn}{bp^2} = A \frac{Cn}{bp^2}. \tag{22}$$

Постоянный коэффициент A можно вычислить приближенно или определить непосредственно из опыта. Произведем приближенную оценку величины A.

Нашими исследованиями работы единичного резца установлено, что статистическое значение величины $A = 0{,}25$. При изменении кристаллографических симметричных углов алмазов α от 60 до 90° среднее квадратичное значения $\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} \approx 1$. Породы, которые можно подвергнуть разрушению дробью, имеют твердость по Л. Н. Шрейнеру около 75—100 *кГ/мм*^{2}, т. е. относятся к твердым породам V категории по 12-балльной классификации горных пород по буримости Министерства геологии СССР. При этих данных $A \approx 100$ *кГ/мм*^{2}.

Определение постоянной A по экспериментальным данным. Из формулы (22)

$$A = \frac{v_м}{Cn} bp^2 \approx sbp^2. \tag{23}$$

Заменяя твердость горной породы прочностью при одноосном сжатии, из отношения, теоретически установленного Генки [Шрейнер, 1958],

$$p = (2\pi + 1)\sigma_{сж}, \tag{24}$$

находим

$$A = 53sb\sigma_{сж}^2. \tag{25}$$

Численное выражение $s = \frac{v_м}{Cn}$ [Sasaki, 1962] для линейной части зависимости $v_м = \psi(C)$, изображенной на рисунке и ограниченной значениями осевых нагрузок C_1 и C_2, приведено в таблице. Эти данные получены в лаборатории при бурении однослойной коронкой $D_к = 46$ *мм*, содержащей 340 алмазов общим весом 10 карат. Нами по формуле (25) и данным таблицы вычислена величина A. Небольшие отклонения ее от среднего и отсутствие систематических отклонений, обусловленных прочностью породы, подтверждают справедливость формулы (22) и позволяют принять $A \approx \approx 100$ *кГ/мм*^{2}.

Экспериментальные и расчетные данные по бурению мелкоалмазной коронкой

Порода	$\sigma_{сж}$, *кГ/мм*^{2}	$M_у$*, *мм*	s, *мм/кГ*, на 1 оборот	C_1, *кГ*	C_2, *кГ*	A, *кГ/мм*^{2}	$\frac{A - A_{ср}}{A}$, %
Гранит	17,30	7,4	0,78	200	1100	87,0	—10
Песчаник грубозернистый	10.30	9,5	2,60	30	355	100,0	+3,4
Песчаник 1	11.10	7,3	2,00	25	335	91.6	—5,8
» 2	15,50	7,4	1,27	40	610	112,6	+15
» 3	5,90	7,3	—	—	—	—	—
» 4 . . .	10,80	7.3	2,27	20	375	91	—5,9
Песчаник тонкозернистый	15,0	7,3	1,11	40	600	92	—4,6
Изверженная порода	17,50	6,1	0,88	40	650	103,0	+6,4
	$M_{у ср} = 7{,}45$					$A_{ср} = 96{,}7$	

* $M_у$ — удельный момент сопротивления на торце коронки, т. е. момент отнесенной к 1 *кГ* осевой нагрузки на забой.

Поэтому расчетной формулой для скорости проходки будет

$$v_м = 100\frac{Cn}{bp^2} \text{ мм/мин}$$

или

$$v_м = 6\frac{Cn}{bp^2} \text{ м/ч}. \tag{26}$$

Более подробное исследование показало, что формула (22) справедлива при $p_0 \geqslant 75$ *кГ/мм*^{2}, что соответствует $\sigma_{сж} \geqslant 10$ *кГ/мм*^{2}. Практически при расчете по формуле (22) необходимо определять осевую нагрузку C, равную C_2, при которой достигается наибольшая возможная скорость проходки для данной коронки

$$C_2 = q_2 S_{т.к}, \tag{27}$$

где q_2 — среднее удельное давление на забой, *кГ/мм*^{2}; $S_{т.к}$ — рабочая площадь торца коронки, *мм*^{2}.

Удельное давление q_2 зависит от твердости породы, линейного размера алмаза и конструктивной насыщенности коронки алмазами. С достаточным для практики приближением оно определяется выражением

$$q_2 = 0{,}003 \frac{dp}{c_н}, \tag{28}$$

где 0,003 — опытный коэффициент, имеющий размерность 1/*мм*. $d = \frac{4{,}75}{\sqrt[3]{z}}$ — средний диаметр алмаза, *мм*; z — зернистость алмазов, шт./карат; $c_н$ — безразмерный коэффициент, характеризующий насыщенность коронки алмазами.

Для определения $c_н$ обозначим радиальный шаг установки алмазов в коронке $x = k_1 d$ и окружной шаг установки $y = k_2 d$, где k_1 и k_2 — безразмерные коэффициенты. Тогда $k_1 k_2 = c_н$ и, очевидно, $c_н \geqslant 1$. В современных коронках обычно $k_1 = 2$ и $k_2 = 2$, поэтому $c_н \approx 4$.

Из формулы (28) следует, что при $dp = \text{const}$ удельное давление на забой q_2 не зависит от твердости породы. Применение коронок, снабженных более мелкими алмазами, при бурении более твердых пород позволяет уменьшить нагрузку на алмазы и предотвратить их аварийное разрушение при перегрузках. Этим технологическим принципом и руководствуются при выборе коронок.

Так как наибольшее значение скорости проходки

$$v_м = 6 \frac{q_2 \pi D n}{p^2}, \tag{29}$$

то при q_2, не зависимом от p, скорость бурения обратно пропорциональна квадрату твердости породы (D — средний диаметр коронки, *мм*). Эта формула и легла в основу предлагаемой шкалы буримости.

Для иллюстрации по формуле

$$v_м = \frac{151\,000}{p^2} \tag{30}$$

рассчитана буримость горных пород по 12-балльной классификации пород по буримости Министерства геологии СССР для коронки $D_к = 59$ *мм* при $q_2 = 0{,}6$ *кГ/мм*^{2} и $n = 257$ *об/мин* (среднее из третьей скорости вращения станков типа ЗИФ-300 и ЗИФ-650):

Категория пород по буримости	VIII	IX	X	XI	XII
Расчетное значение твердости по Л. А. Шрейнеру [1958], *кГ/мм*^{2}	350	450	550	650	800 и больше
Скорость бурения, *м/ч*:					
по формуле (30)	1,23	0,75	0,50	0,35	0,16
по временной шкале буримости для алмазного бурения	1,28	0,76	0,48	0,32	0,15

При бурении одной коронкой в различных по твердости породах удельное давление повышают с увеличением твердости.

В этом случае скорость проходки обратно пропорциональна твердости в первой степени.

В результате изложенного можно определить расход алмазов при бурении и затраты мощности при работе коронки на забое. Средний весовой расход алмазов на единицу проходки

$$J_в = \frac{\gamma \omega_0 \mu}{A} \pi D b p^2, \tag{31}$$

где γ — плотность алмазов, *кГ/мм*^{3}.

Как видно из формулы, средний расход алмазов не зависит от нагрузки на забой C, числа оборотов коронки n и пропорционален среднему диаметру коронки. Фактический средний расход алмазов первого сорта, т. е. с учетом полной отработки коронок, за вычетом алмазов, оставшихся в коронке, $J_в = 2 \cdot 10^{-8} Dp^2$ *карат/м* при ширине торца коронки $b = 7$ *мм*.

Эту формулу можно использовать при расчете эксплуатационных норм расхода алмазов, которые включают и оставшиеся в коронке алмазы, поступающие на завод — изготовитель коронок.

Мощность, потребляемая коронкой на забое,

$$W = \frac{0{,}38\pi}{1000 \cdot 60 \cdot 102} CDn = 2 \cdot 10^{-7} CDn, \tag{32}$$

где C — осевая нагрузка, *кГ*; n — число оборотов коронки в минуту.

Независимо от конструкции коронки в формулу (32) подставляют фактическое значение осевой нагрузки на забой при бурении.

Анализ процесса разрушения твердых горных пород при бурении мелкоалмазной коронкой позволил получить простые зависимости, связывающие скорость проходки, расход алмазов, затраты энергии на забое с параметрами режима бурения. Эти зависимости прошли практическую проверку и могут применяться при инженерных расчетах и анализе производственных данных.

ЛИТЕРАТУРА

Шрейнер Л. А. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. Гостоптехиздат, 1958.

Эпштейн Е. Ф. Теория бурения — резания горных пород твердыми сплавами. ГОНТИ, 1939.

Sasaki. Industrial diamond review, vol. 22, № 258, 1962.
