

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розглянуті питання застосування в гірничовидобувній промисловості породоруйнуючих інструментів з полікристалічних надтвердих матеріалів

Одними из наиболее перспективных инструментальных материалов для оснащения породоразрушающего инструмента в настоящее время являются поликристаллические сверхтвердые материалы, обладающие высокой твердостью, износостойкостью, теплопроводностью, прочностью и трещиностойкостью. Однако реализация уникальных свойств поликристаллических сверхтвердых материалов в породоразрушающем инструменте затруднена в связи с их высокой чувствительностью к термическому воздействию и динамическим нагрузкам, сложностью крепления, а также недостаточной изученности процесса их взаимодействия с горной породой. Это потребовало углубления представлений о механизме разрушения горных пород инструментом их ПСТМ и определения области их эффективного использования.

При исследовании процесса контактного взаимодействия алмазно-твердосплавных пластин с горной породой принималось, что в области контакта одновременно имеют место упругие перемещения $w(x,y)$ вдоль оси z , описываемые уравнением

$$w(x,y) = k p(x,y), \quad (1)$$

где $p(x,t) > 0$ - контактное давление в точке x поверхности породы, совпадающее с давлением в точке реза $\mathfrak{x} = x - Vt$ в момент времени t ($p(x,t) = p(\xi,t)$, а также необратимые перемещения вдоль оси z , $u(x,t)$, которые подчиняются соотношению

$$\frac{du}{dt}(x,t) = \mathfrak{x}(V) p(x,t) \quad (2)$$

Необратимые перемещения характеризуют разрушение породы под резцом, вследствие образование зоны предразрушенной поверхности. Необходимость учета в математической модели указанных перемещений установлена на основании изучения процесса резания горной

породы под электронным микроскопом на специальной тензоустановке. Конкретный вид зависимости $\alpha(V)$ должен выбираться с учетом механических характеристик разрушаемой породы. Поэтому условие контакта реза с породой может быть записано следующим образом:

$$z_0(x) - w(x,t) - u(x,t) = f(x-Vt) - c(t). \quad (3)$$

В дифференциальной форме с учетом (1) и (2) это соотношение имеет вид:

$$\alpha(V)p(x,t) + k \frac{dp(x,t)}{dt} = \frac{dc(t)}{dt} - \frac{df(x-Vt,t)}{dt}. \quad (4)$$

Наряду с упругим деформированием и образованием зоны предразрушения при внедрении инструмента имеет место разрушение породы с отделением стружки, которое является одной из причин возникновения осциллирующего характера изменения сил, действующих на инструмент.

Образование стружки скола в массиве горной породы происходит вследствие развития трещины, которое начинается вблизи вершины реза. При моделировании этого процесса принималось, что отделение стружки породы происходит в момент времени t^* , когда горизонтальная составляющая давления в точке ξ^* достигает критического значения p^* , т.е.:

$$p(\xi^*, t^*) = p^*. \quad (5)$$

При этом из точки $x^* = \xi^* + Vt^*$ развивается трещина. Предполагается, что трещина представляет собой ломаную линию $l(x)$ (рис.1), угол наклона которой α на каждом отрезке $[x_i, x_{i+1}]$ длиной $\Delta x = |x_{i+1} - x_i|$ есть случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0; \alpha^*]$. $\alpha^* = \arctg(\partial f(\xi, t)/\partial \xi)$ представляет угол наклона профиля реза к оси x в точке x^* .

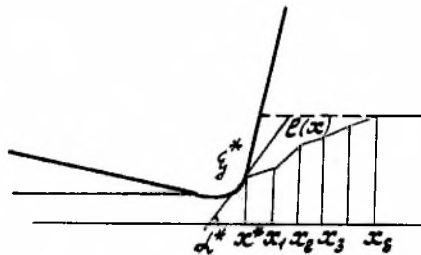


Рис. 1. Схема распространения трещины

Трещина развивается вплоть до выхода на поверхность в некоторой точке x_s .

$$l_s(x_s) = z_0(x_s)|_{t^*=t_0}.$$

Отделение стружки приводит к изменению формы границы породы перед резцом:

$$\begin{aligned} z_0(x)|_{t=t^*+0} &= l(x), & x^* < x < x_s; \\ z_0(x)|_{t=t^*+0} &= z(x)|_{t=t^*-0} & x > x_s. \end{aligned} \quad (6)$$

Для моделирования износа инструмента на основе ПСТМ в процессе резания горной породы использовалось соотношение, которое обычно применяют для описания абразивного износа

$$\frac{\partial f_n(\xi, t)}{\partial t} = K_w P_n(\xi, t) v. \quad (7)$$

Здесь $\partial f_n(\xi, t) / \partial t$ и $P_n(\xi, t)$ - интенсивность изнашивания и контактное давление по нормали к поверхности трения, v - скорость относительного перемещения изнашиваемого тела и абразивной среды, K_w - коэффициент износа. Исходя из рассмотрения геометрии, получаем:

$$v = V / \cos(\alpha), \quad \partial f_n(\xi, t) / \partial t = \partial f(\xi, t) / \partial t \cos(\alpha),$$

где α - угол наклона профиля резца к оси x в каждой точке ξ ; $\cos^2(\alpha) = 1 + [\partial f(\xi, t) / \partial \xi]^2$, $P_n(\xi, t) = p(\xi, t)$ в случае отсутствия сил трения между резцом и породой. Тогда изменение формы инструмента вследствие износа определяется следующим соотношением

$$\frac{\partial f(\xi, t)}{\partial t} = K_w P(\xi, t) V \left\{ 1 + \left[\frac{\partial f}{\partial \xi}(\xi, t) \right]^2 \right\}. \quad (8)$$

Соотношения (3), (5-8) позволяют построить взаимоувязанную модель износа резца при разрушении горной породы. На основе этого построена процедура расчета характеристик нестационарного процесса разрушения при одновременном упругом деформировании породы, образовании зоны предразрушения, отделении стружки и износе резца.

Характерная форма резца, рассчитанная для различных значений параметров модели, представлена на рис.2 (кривая 1 соответствует $p^{\circ*} = 0,84$, $\alpha_1 / k = 40 \text{ мм}^{-1}$; кривая 2 - $p^{\circ*} = 0,28$, $\alpha_1 / k = 40 \text{ мм}^{-1}$; кри-

вая 3 - $p^{\circ*}=0,14$, $\varepsilon_1/k=20 \text{ мм}^{-1}$; кривая 4 - $p^{\circ*}=0,28$, $\varepsilon_1/k= 10 \text{ мм}^{-1}$).

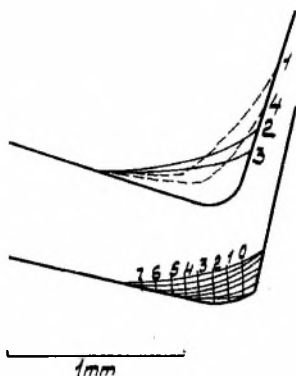


Рис.2. Расчетные (а) и экспериментальные (б) формы износа алмазно-твердосплавных пластин

Как видно из рисунка, форма изношенной поверхности инструмента существенно зависит от механических характеристик породы, которые в данном случае определяют соотношение упругой деформации и образующихся зон предразрушенной и разрушенной поверхностей. Набор параметров модели, соответствующий кривой 2, дает форму изношенной поверхности близкую к форме резца, определенной экспериментально.

Кинетика износа в этом случае, как показывают расчеты, в деталях воспроизводит кинетику износа реального резца, что свидетельствует об адекватности разработанной модели реальным процессам разрушения горных пород алмазно-твердосплавными пластинами. Поэтому разработанная математическая модель позволяет прогнозировать изменение формы изношенной поверхности поликристалла и составляющих силы резания в зависимости от свойств породного массива и является эффективным инструментом исследования процесса резания горных пород ПСТМ, особенно в случаях изучения быстропротекающих процессов, когда экспериментально зафиксировать изменения параметров резания практически невозможно.

Для подтверждения результатов аналитических исследований был проведен большой объем экспериментальных исследований процесса взаимодействия ПСТМ с горной породой.

Исследования процесса разрушения горных пород резцами, оснащенными алмазно-твердосплавными и твердосплавными пластинами идентичной формы, проводились при резании песчано-цементных блоков с временным сопротивлением одноосному сжатию $\delta_{сж} = 30$ МПа абразивностью $a = 42$ мг и песчаника Требовлянского месторождения ($\delta_{сж} = 78$ МПа, $a = 30$ мг) при различных режимах резания.

Установлено, что силы резания при разрушении горных пород резцами, оснащенными алмазно-твердосплавными пластинами, в 1,2-1,7 раза ниже аналогичных параметров, наблюдаемых при резании твердосплавным инструментом. Это может быть объяснено несколькими причинами: более интенсивным износом пластин из твердого сплава, различными коэффициентами трения твердого сплава и АТП, а также различным механизмом разрушения горной породы.

Для углубления представлений о механизме разрушения горных пород алмазно-твердосплавными пластинами были проведены оригинальные исследования процесса резания образцов породы под электронным микроскопом на специальной тензометрической установке. Это впервые позволило непосредственно наблюдать при многократном увеличении все стадии процесса разрушения горных пород резцами, оснащенными алмазно-твердосплавными пластинами.

Наблюдения за процессом образования трещин показало, что при резании алмазно-твердосплавными пластинами разрушение происходит за счет преимущественного развития горизонтальной трещины сдвига, в то время как при резании твердосплавными резцами возникновение трещины инициируется преимущественно за счет напряжений сжатия. Подтверждением данного вывода являются также результаты измерения параметров стружек, образующихся при бурении песчаника алмазно-твердосплавными и твердосплавными резцами. Установлено, что в последнем случае среднестатистический размер стружек в 1,4-1,5 раза меньше, чем при использовании инструмента из АТП.

Для объяснения механизма формирования зоны предразрушения изучался процесс микрорезания прочных горных пород микрорезцами, оснащенными АТП и твердым сплавом ВК6В, выполненными в виде секторов дисков диаметром 13,5 мм. При этом использовались микрорезцы как с новыми алмазно-твердосплавными пластинами, так и с пластинами, имеющими площадки затупления на поликристаллическом слое. Эксперименты проводились на специальном приборе для склерометрических исследований, изготовленном на базе инструментального микроскопа УИМ-21.

Процесс микрорезания осуществлялся при постоянной осевой нагрузке 1,0 Н и 1,5 Н. При этом на одной трассе длиной 20 мм наносили последовательно царапины до стабилизации тангенциальной составляющей силы резания P_z .

Установлено, что при многократном последовательном резании образцов породы их сопротивление разрушению снижается. Одновременно с увеличением количества проходов изменяется характер колебаний индентора (резца) при микрорезании, при этом происходит увеличение доли низкочастотных составляющих колебаний, что свидетельствует об улучшении диспергирования материала.

Анализ результатов экспериментов показывает, что при микрорезании мрамора резцами из АТП, имеющими ранее сформированную режущую кромку на поликристаллическом слое, достигается наибольшее снижение тангенциальной составляющей силы резания P_z , которое при третьем проходе составляет 29 и 26% для нагрузки 1,0 и 1,5 Н соответственно, в то время как при работе новой АТП - 22 и 16%, а твердым сплавом - 16 и 20%, соответственно.

Указанное снижение тангенциальной составляющей силы резания P_z , очевидно, вызвано образованием поврежденного слоя на поверхности породы. В связи с этим, основываясь на выполненных экспериментальных исследованиях, для установления причины более существенного снижения тангенциальной составляющей силы резания P_z при использовании приработанной пластины и объяснения механизма работы ПСТМ была выдвинута гипотеза о том, что при резании прочных горных пород поликристаллическими сверхтвердыми материалами процесс разрушения осуществляется не только всей поликристаллической пластиной, но и микровыступами алмазов, формирующиеся на режущей кромке и задней поверхности инструмента.

При этом выступающие алмазы при внедрении в породу создают высокие контактные напряжения и дополнительную сеть микротрещин, взаимодействующих с микротрещинами, образующимися от внедрения всей режущей кромки пластины. В результате воздействия одновременно двух независимых источников концентраций напряжений увеличивается зона предразрушенного слоя в массиве горной породы и его пораженность, что приводит к более существенному снижению прочности по сравнению с воздействием лишь одного поликристалла (в случае применения новой пластины) или только алмазных зерен (при бурении алмазным инструментом).

Для подтверждения выдвинутой гипотезы был проведен комплекс исследований по изучению микрорельефа режущей кромки и

задней поверхности поликристалла, контактирующих при резании с массивом горной породы. Фрактоскопические исследования проводились с использованием метода растровой электронной микроскопии на микроскопе-анализаторе "Самскан-4DV".

Изучение ПСТМ на электронном микроскопе показывает, что рельеф режущей поверхности работавших АТП и синдрилла в отличие от новых пластин имеет множество микровыступов, образованных на поликристаллическом слое. Данный микрорельеф формируется на работающих ПСТМ, изготовленных из алмазов всех зернистостей, в то время как в исходном состоянии микровыступы на поверхности ПСТМ отсутствуют.

Для изучения микрогеометрии торца ПСТМ был использован метод стереоскопической фрактоскопии, позволяющий качественно и количественно оценить особенности деталей микрорельефа. Данный метод анализа исследуемой поверхности аналогичен методу, применяемому при аэрофотосъемках рельефа местности. Построение рельефа поверхности осуществляется по двум фотографиям (стереопаре), снятым под разными углами к направлению съемки на стереокомпараторе "Stecometer-E" путем совмещения изображения мнимой марки М с точками рельефа поверхности (принцип мнимой марки).

Анализ стереопар режущих кромок новых и работавших алмазно-твердосплавных пластин с алмазами различной зернистостью, а также соответствующих им профилей, полученных методом стереоскопической фрактоскопии, показывает, что рельеф режущей поверхности новых алмазно-твердосплавных пластин представляет практически гладкую поверхность без каких-либо микровыступов алмазов на поликристаллическом слое. Это объясняется технологией механической обработки пластин после спекания в аппаратах высокого давления (алмазно-твердосплавные пластины шлифуются алмазными кругами по торцам и цилиндрической поверхности).

В результате образуется острая режущая кромка с радиусом округления 0,02-0,03 мм, которой и осуществляется процесс резания горной породы. В то же время режущая поверхность работавших АТП в результате взаимодействия с разрушаемой породой претерпевает существенные изменения, приобретая рельефную поверхность со множеством микровыступов алмазов.

Математическая обработка результатов измерений профилей рабочей поверхности поликристалла, полученных на стереокомпараторе, показала, что высота указанных микровыступов находится в пределах

5-25 мкм, что соизмеримо с высотой выступания алмазных зерен в мелкозернистых шлифовальных кругах.

Характерно, что данные микровыступы на режущей кромке ПСТМ образуются на поликристаллических пластинах, спеченных из алмазов всех зернистостей. При этом высота микровыступов практически не зависит от зернистости исходных шлифпорошков, а определяется условиями контактного взаимодействия с разрушаемой породой, так как микровыступы представляют собой не отдельные алмазные зерна, составляющие основу поликристалла, а их конгломераты.

Соответственно работу всех пластин из поликристаллических сверхтвердых материалов можно представить как результат суммарного воздействия на породу режущей поверхности поликристалла и микровыступов, расположенных на его режущей кромке.

Подтверждением этого являются также результаты изучения микропрофиля реза, образованного новой и работавшей ранее АТП, показывающие, что в последнем случае микропрофиль помимо основной канавки имеет микровпадины на участке затупления режущей кромки поликристалла, в то время как при резании новой пластиной, данные микровпадины отсутствуют. Это свидетельствует об активном участии в процессе формирования поверхности резания микровыступов режущей кромки, которые создают дополнительные повреждения в поверхностном слое породы, приводящие к его разупрочнению.

Для определения степени разупрочнения поверхностного слоя и его глубины была использована методика люминесцентной дефектоскопии горных пород, разработанная И.А.Свешниковым и Г.В.Арцимовичем, которая включала нанесение люминесцентной жидкости высокой проникающей способности на поверхность резания, разрезание данной поверхности в поперечном и продольном направлениях, ее полирование и последующий анализ в ультрафиолетовом освещении на специальных микроскопах и дефектоскопах. Одновременно для оценки влияния силового фактора проводилась регистрация составляющих силы резания P_z , P_y .

Установлено, что глубина предразрушенного слоя, возникающего в результате воздействия приработанной пластины составляет 3-6 мм, что в несколько раз превышает глубину резания алмазотвердосплавными пластинами крепких горных пород. В то время как при резании острой АТП глубина поврежденного слоя оказывается в 2-3 раза меньше. При этом составляющие силы резания P_z , P_y в случае использования приработанной пластины были лишь на 30-50 %

выше по сравнению с аналогичными параметрами, фиксируемыми при резании породы резцами с острой режущей кромкой. Размеры зоны предразрушения, образующейся в результате воздействия работавшей ранее АТП и твердосплавной вставки близки между собой, несмотря на то, что в последнем случае составляющие силы резания в 1,7-2,5 раза выше.

Данные закономерности, нашедшие подтверждение во всех проводимых экспериментах, свидетельствуют об активном участии микровыступов на режущей кромке ПСТМ в формировании вновь образующейся поверхности горной породы.

Это подтверждает выдвинутую гипотезу о том, что при резании крепких горных пород поликристаллическими сверхтвердыми материалами разрушение осуществляется не только всей поликристаллической пластиной, но и микровыступами алмазов, образующимися на режущей кромке и задней поверхности ПСТМ в процессе работы. Соответственно при работе системы резцов, оснащенных алмазно-твердосплавными пластинами, необходимо создание условий, при которых обеспечивается взаимодействие зон предразрушенных поверхностей.

Для установления влияния геометрических параметров резцов, оснащенных алмазно-твердосплавными пластинами, на силовые характеристики процесса резания горных пород был проведен комплекс экспериментальных исследований. Резание осуществлялось специальными резцами, оснащенными АТП, диаметром 13,5 мм с различными передними и задними углами, а также с изменяющимся углом наклона главной режущей кромки. При этом передний угол α изменялся от -0° до -25° , задний угол β от 0° до $+25^\circ$ и угол наклона главной режущей кромки λ - от 0° до -12° .

В исследованиях использовались блоки породы с различными физико-механическими свойствами: газганский мрамор ($R_{шт}=730$ МПа), известняк ($R_{шт}=960$ МПа), требовлянский песчаник ($R_{шт}=1590$ МПа), гранит серый ($R_{шт} = 2200-2500$ МПа). Скорость резания во всех экспериментах оставалась постоянной и составляла 1,5 м/с, что соответствует ее средним значениям для породоразрушающего инструмента из сверхтвердых материалов. Глубина резания при этом изменялась от 1,0 до 7,0 мм.

Установлено, что с увеличением отрицательного переднего угла α составляющие силы резания P_z , P_y увеличиваются независимо от глубины резания и обрабатываемого материала. При этом минимальные значения P_z , P_y наблюдаются при $\alpha=-5^\circ \dots -10^\circ$. Оптимальные

значения угла λ наклона режущей кромки для АТП находится в пределах 5-8 °.

В то же время при глубине резания равной 1-2 мм разница в значениях составляющих силы резания P_z , P_y при резании мягких и прочных пород невелика и составляет 500-100 Н, что свидетельствует о возможности обработки поликристаллическими сверхтвердыми материалами не только мягких, но и крепких пород типа гранита и песчаника в случае поддержания стабильного теплового режима, исключающего катастрофический износ АТП вследствие графитизации.

Основываясь на результатах выполненных исследований по изучению процесса контактного взаимодействия ПСТМ с горной породой, можно утверждать, что областью возможного применения горнорезущего инструмента из поликристаллических сверхтвердых материалов является широкий диапазон пород прочностью до 160-180 МПа. Однако необходимым условием для эффективного применения этого инструмента является исключение влияния температурного фактора и динамического воздействия за счет обеспечения обильного охлаждения, создания специальных конструкций резцов, обеспечивающих разрушения прочных, но нетрещиноватых пород.

С учетом перечисленных требований был разработан ряд новых высокоэффективных конструкций инструмента, оснащенного алмазно-твердосплавными пластинами: резцы для вращательного бурения шпуров, анкерных и дегазационных скважин, инструменты для различных типов камнерезных машин, которые нашли широкое применение в угольной, камнедобывающей и строительной отраслях промышленности.

УДК 622.281.74

В.В. Радченко

АНКЕР-ПОЛИМЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СЛАБЫХ ПОРОД ПОЧВЫ ВЫРАБОТОК

На базі шахтних досліджень виконано якісну і кількісну оцінку впливу анкер-полімерного зміцнення порід підшви виробок з метою зменшення їх видавлювання.

Бібліогр: 1 найм.

Анализ инженерно-геологических условий отработки угольных пластов со слабометаморфизированными вмещающими породами (Красноармейск, Селидово, Доброполье, Павлоград, Южный Донбасс, Львовско-Волынский бассейн) свидетельствует о том, что в большин-