

На основе проведенных исследований были разработаны несколько конструкций алмазных буровых коронок, обеспечивающих хорошее охлаждение алмазов и вынос шлама. Одним из них является алмазная буровая коронка типа БИТ, серийно выпускаемая Кабардино - Балкарским заводом алмазного инструмента. В нем реализована возможности высокой удельной нагрузки на алмаз по сравнению с коронками, с секторами чемоданного типа.

**Выводы.** Анализ фракционного состава образующегося шлама дает основание полагать, что при алмазном бурении забоя реализуется множество механизмов разрушения: микрорезание, резание, микросплавление, раздавливание и даже нежелательное шлифование. В случае недостаточной промывки толщина невынесенного из-под торца коронки шлама растет, алмазные зерна перестают контактировать с забоем, который перестает разрушаться. Невынесенный шлам вызывает повышенный износ алмазов, их перегрев и прижег коронки. Влиянию формы алмазосодержащих секторов матрицы на распределение температуры в алмазной коронке исследовался моделированием методом электротепловой аналогии (эквипотенциальных линий). В качестве основы применялась электропроводная бумага с сажевым покрытием. В результате установлена, что трапециевидная форма алмазосодержащих секторов обеспечивает значительно большую теплоотвод с рабочего торца коронки, чем обычный, так называемый «чемоданный» тип секторов. Механизм разрушения – не однозначный процесс, зависящий как от конструкции алмазной буровой коронки, так и в значительной мере от физико-механических свойств разрушаемой породы. Знание теплофизических законов процесса бурения имеет важное значение при разработке режимов бурения алмазными коронками. Необходимо выводить алмазосодержащий слой из высоко температурной зоны, или, по крайней мере, защитить от теплового воздействия не работающие в данный момент алмазы.

#### Список литературы

1. Гразов М.Г. «Алмазосберегающая, технология бурения» Разведка и охрана недр 1983, №4.
2. Марамзин А.В., Блинов Г.А., Галиопа А. - Технические средства для алмазного бурения. - Л.: Недра, 1982.
3. Исаев М.И., Понамарев П.В. Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин. - М.: Недра, 1975.
4. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов М., Машиностроение, 1981.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - С.: Энергиздат, 1981.
6. Аубакиров М.Т. В механизме разрушения крепких горных пород алмазными буровыми инструментами / М.Т. Аубакиров, Б.Т.Ратов, Б.В.Федоров // Инновационные технологии и проекты в горно-металлургическом комплексе, их научное и кадровое сопровождение: материалы междунар. научно-практ. конф., 18-19 марта, 2014 г., г. Алматы. – А.: КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2014. С. 323-327.

## **АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГОРНУЮ ПОРОДУ ПРИ БУРЕНИИ АЛМАЗНЫМИ КОРОНКАМИ**

*А.А. Кожевников, Национальный горный университет, Украина*

*Ю.Н. Вахалин, О.В. Ливак, Украинский государственный химико-технологический университет, Украина*

*А.Ю. Дреус, Днепрпетровский национальный университет им.О.Гончара, Украина*

В работе обоснована методика исследования и представлены результаты расчета параметров разрушения горной породы при переменном термическом воздействии инструмента и охлаждающей жидкости. Показано, что возникающие при работе буровой коронки знакопеременные термомеханические напряжения способствуют, при определенных

условиях, разрушению горной породы и могут быть использованы для повышения эффективности алмазного бурения.

**Введение.** При бурении скважины алмазными буровыми коронками рабочая поверхность забоя подвергается знакопеременному температурному воздействию разогретого сектора матрицы коронки и холодной промывочной жидкости. Вследствие этого, в приповерхностном слое будут развиваться нормальные сжимающие (при нагреве) и растягивающие (при охлаждении) напряжения по глубине горной породы. При определенных условиях горная порода может растрескиваться под действием таких температурных напряжений. Таким образом, термическое действие коронки и охлаждающей жидкости, может служить дополнительным фактором, способствующим разрушению породы.

Эффект термоциклического воздействия широко применяется в технологиях термомеханического разрушения горных пород [1], в которых рабочая поверхность подвергается относительно продолжительным интенсивным переменным воздействиям горячего и холодного теплоносителя, что приводит к ее разупрочнению. Теория развития трещин в породе при термических способах разрушения разработана в работах [2,3]. Термоциклическое воздействие также может проявляться в качестве разупрочняющего фактора в сочетании с механическим воздействием, как это имеет место при алмазном бурении.

При бурении алмазной коронкой, в отличие от термомеханических способов бурения, контакт породы с горячей коронкой и холодной средой происходит в течение очень малых промежутков времени. В тоже время, в [4] расчетным путем показано, что при алмазном бурении в тонком поверхностном слое породы возникают значительные перепады температур, которые имеют циклический характер. Таким образом, в случае алмазного бурения могут также создаваться условия для термомеханического разрушения горной породы. Однако до настоящего времени, эффекты, связанные с термоциклическими явлениями при работе буровой коронки, не исследовались.

**Целью** данной работы является исследование термоциклического эффекта в породе при бурении алмазными буровыми коронками.

**Постановка проблемы и исследование.** Будем считать, что горная порода содержит сеть микротрещин распределенных по объему с некоторой плотностью [5]. Часть этих естественных микротрещин выходит на свободную поверхность забоя. Кроме того, в породе образуются трещины вследствие работы породоразрушающего инструмента (зона предразрушения). В результате резкого снижения температуры на поверхности горной породы, в поверхностном слое развиваются растягивающие напряжения, которые могут вызвать рост этих трещин. Решение задачи о росте трещины с начальной длиной  $l$ , под действием равномерно распределенной нагрузки  $\sigma^*$  на основе теории термоупругости выполнено в [2]. Результаты этих исследований показывают, что трещины при охлаждении породы развиваются не сразу с момента начала охлаждения, а только по истечении некоторого промежутка времени, называемого временем задержки, которое уменьшается с увеличением перепада температур. В случае интенсивного охлаждения породы, время задержки связано с начальной длиной трещины соотношением, полученным на основе теории равновесных трещин в [2,3]

$$\frac{1}{\sqrt{L}} = 1 - \int_0^1 \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\xi \cdot L}{2\sqrt{\mathbf{Fo}}}\right)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi - \int_0^1 \frac{\exp(\mathbf{Bi} \cdot \xi \cdot L + \mathbf{Bi}^2 \cdot \mathbf{Fo})(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\xi \cdot L}{2\sqrt{\mathbf{Fo}}} + \mathbf{Bi} \cdot \sqrt{\mathbf{Fo}}\right))}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (1)$$

где  $L = \frac{l}{l_*}$ ;  $\mathbf{Fo} = \frac{a \cdot \tau}{l_*^2}$  – критерий Фурье;  $\mathbf{Bi} = \frac{\alpha \cdot l_*}{\lambda}$  – критерий Био;  $\xi = \frac{x}{l_*}$ ;  $x$  – координата по глубине слоя (начало отсчета расположено на поверхности забоя), м;  $l$  – начальная длина

трещины, м;  $l_*$  – минимальная длина трещины, м, при которой тело начинает разрушаться, если оно находится под равномерно распределенной нагрузкой  $\sigma_*$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности горной породы, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – время, с;  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности породы, Вт/(м·К). Значение  $l_*$  определяется из энергетического критерия Гриффитса

$$\sigma_* = \frac{K\sqrt{2}}{\pi\sqrt{l_*}},$$

где  $K$  – константа материала, называемая модулем сцепления, Н/м<sup>3/2</sup>.

Для случая наиболее жестких условий (граничные условия 1 рода), что соответствует высокоинтенсивному процессу охлаждения породы, имеющему место при термическом разрушении горных пород, последним слагаемым в (1) можно пренебречь. Тогда, с учетом разложения функции ошибок в ряд, выражение (1) может быть приведено к более простому виду

$$\frac{1}{\sqrt{L}} = 1 - \frac{L}{\sqrt{\pi^3 \mathbf{Fo}}}. \quad (2)$$

Рассмотрим условия, при которых формула (2) может быть использована для расчета времени задержки при бурении алмазными коронками. Анализ (1) показывает, что третьим слагаемым можно пренебречь, если

$$\operatorname{erf}\left(\frac{\xi \cdot L}{2\sqrt{\mathbf{Fo}}} + \mathbf{Bi} \cdot \sqrt{\mathbf{Fo}}\right) \rightarrow 1.$$

Используя свойства функции ошибок, примем, что данное условие выполняется когда

$$\frac{\xi \cdot L}{2\sqrt{\mathbf{Fo}}} + \mathbf{Bi} \cdot \sqrt{\mathbf{Fo}} \geq 2.$$

Данное неравенство будет выполняться для любого значения  $\mathbf{Fo}$  при

$$\mathbf{Bi}_x \geq 2, \quad (3)$$

где  $\mathbf{Bi}_x = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda}$  – локальный критерий Био, рассчитанный по координате  $x$ . Таким образом, определим условия теплообмена, при которых формула (2) может быть использована для расчета теплонапряженного состояния горной породы при бурении алмазными коронками. Например, при бурении по граниту  $\lambda = 1.8$  Вт/(м·К) для трещин с минимальной начальной длиной  $l_* = 0.0005$  м получим, что для корректного использования (2) необходимо обеспечить минимальное значение коэффициента теплоотдачи с поверхности породы

$$\alpha = \frac{\mathbf{Bi}_x \cdot \lambda}{l_*} = 7.2 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}.$$

С другой стороны, для расчета  $\alpha$  может быть использовано полуэмпирическое уравнение

для теплоотдачи при натекании струи на поверхность [6]

$$\text{Nu} = 0.602 \cdot \text{Re}^{0.5} \cdot \text{Pr}^{0.374}, \quad (4)$$

где  $\text{Re} = \frac{w \cdot \Delta / 2}{\nu}$  – критерий Рейнольдса,  $\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot \Delta / 2}{\lambda_l}$  – критерий Нуссельта,  $w$  – скорость набегающего потока,  $\lambda_l$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);  $\Delta$  – ширина промывочного канала коронки, м. Выразив скорость потока через расход промывочной жидкости в канале

$$w = \frac{Q}{F},$$

где  $Q$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $F$  – площадь сечения промывочного канала м<sup>2</sup>; можем решить уравнение (4) относительно расхода. Расчеты для алмазной коронки диаметром 76 мм, с 6 промывочными каналами шириной по 8 мм, промывочная жидкость – вода с температурой 20 °С, показывают, что такие значения коэффициента  $\alpha$  могут быть обеспечены при расходах более 3 л/мин. Учитывая, что обычно для большинства расчетных режимов бурения используются большие расходы жидкости, можем утверждать, что условие (3) выполняется для большинства практически важных случаев.

Представим (2) в виде

$$\text{Fo} = \frac{1}{\pi^3} \frac{L^3}{\sqrt{L} - 1}. \quad (5)$$

Критерий Фурье, по своему физическому смыслу, является безразмерным временем [6], в нашем случае безразмерное время задержки раскрытия трещины. Характер зависимости времени раскрытия трещины от ее длины представлен на рис.1.

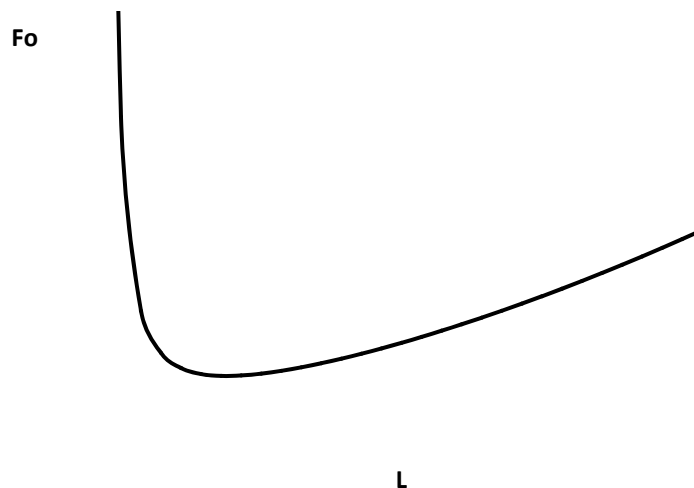


Рис.1. Зависимость безразмерного времени задержки раскрытия трещины (5) от безразмерной длины

Очевидно, по определению  $l_*$ , что при  $L \leq 1$  трещины, раскрываться не будут, для развивающихся трещин  $L > 1$ . В тоже время, из рис.1 видим, что данная зависимость имеет минимум, соответствующий минимальному времени задержки раскрытия трещины с длиной

с  $l > l_*$ . Необходимо отметить, что для достижения подвижно-равновесного состояния требуется, чтобы порода была предварительно прогрета на глубину превышающее значение  $l$ . В работах [4, 7] показано, что термоциклические эффекты проявляются в тонком приповерхностном слое горной породы, толщина которого составляет порядка 1–3 мм и зависит от режима бурения. Значение минимума функции  $Fo(L)$  можем определить из уравнения

$$\frac{dFo(L)}{dL} = 0,$$

или

$$3L^2(\sqrt{L} - 1) - L^{\frac{5}{2}} = 0.$$

Откуда находим  $L_{\min} = 2.25$ , а соответствующее значение критерия Фурье  $Fo_{\min} = 1.47$ .

Таким образом, для трещин в граните ( $a = 8.3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ) с минимальной начальной длиной  $l_* = 0.0005 \text{ м}$  минимальное необходимое время воздействия холодной жидкости составляет 0.443 с. Фактическое время одного контакта холодной жидкости с горячей породой составляет около 0.0043 с, для коронки диаметром 76 мм при частоте вращения 470 об/мин. Очевидно, что для достижения эффекта термического разрушения необходимо многократное воздействие на породу, что достигается за счет вращения инструмента.

**Выводы.** В представленной работе обоснована методика определению параметров термического воздействия на горную породу при бурении скважины алмазными буровыми коронками. Показано, что методика расчета временных параметров разрушения, разработанная для термомеханических способов бурения, может быть использована для расчета алмазного бурения при достаточно интенсивном охлаждении забоя. Определен минимальный коэффициент теплоотдачи, который необходимо обеспечить для корректного применения расчетной методики. Проанализирован характер зависимости времени задержки разрушения горной породы при алмазном бурении от безразмерной длины трещин.

Результаты работы могут быть использованы при разработке конструкции коронок и технологических параметров для повышения эффективности алмазного бурения в целом. В частности, термический эффект воздействия можно повысить за счет использования импульсного охлаждения, когда удастся создать максимальную амплитуду температуры и, следовательно, уменьшить минимальный размер неустойчивой трещины.

#### Список литературы

1. Дмитриев А.П. Термическое и комбинированное разрушение горных пород / А.П. Дмитриев, С.А. Гончаров – М.: Машиностроение. – 1977. – 224 с.
2. Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии / А.Н. Москалев, Е.Ю. Пигида, Л.Г. Керекелица, Ю.Н. Вахалин – К.: Наукова думка. – 1987. – 248 с.
3. Разрушение горных пород при резком охлаждении / А.А. Кожевников, В.В. Крысан, Ю.Н. Вахалин, А.О. Третьяков, О.В. Ливак. – Д.: ТОВ «ЛізуновПрес». – 2011. – 152 с.
4. Кожевников А.А., Дреус А.Ю., Гошовский С.В., Мартыненко И.И. Математическая модель теплопереноса в призабойной зоне горной породы при бурении скважины алмазными коронками. // Сб. науч. трудов ИСМ НАН Украины «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения», вип.11. – 2008. – С. 42 – 47.
5. Мосинец В.Н. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород / В.Н. Мосинец, А.В. Абрамов. – М.: Недра. – 1982. – 248 с.
6. Лыков А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
7. Бродов Г.С. Основы термомеханического колонкового бурения / Г.С. Бродов – СПб.: ВИТР. – 2001.-55 с