

УДК 531:622.24

А. А. Кожевников, д-р техн. наук¹; **А. Ю. Дреус**, кандидат техн. наук²

¹Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,
г. Днепр, Украина

²Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Украина

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН С ИМПУЛЬСНОЙ ПРОМЫВКОЙ

Рассмотрены процессы снижения прочности горной породы при бурении алмазными буровыми коронками за счет значительного температурного градиента при импульсной промывке. Получено приближенное решение задачи о развитии трещин в горной породе для тепловых граничных условий третьего рода, что позволяет исследовать влияние интенсивности теплообмена на механическое состояние породы. Представлены результаты расчета параметров процесса разрушения при бурении алмазными коронками для различных условий охлаждения забоя скважины.

Ключевые слова: алмазное бурение, прочность горной породы, трещинообразование, импульсная промывка

Введение

Как показывают результаты опытного внедрения импульсной промывки скважин при бурении [1], такая технология позволяет улучшить ряд технико-экономических показателей производственного процесса, в частности, увеличить механическую скорость бурения. При этом механизм интенсификации процесса разрушения при таком режиме промывки на сегодняшний день до конца не раскрыт. Отметим, что при работе алмазной буровой коронки на поверхности забоя формируется сложная нестационарная тепловая картина, характерной особенностью которой является чередование участков резкого нагрева и резкого охлаждения. Такая картина обусловлена конструкцией коронки. При движении сектора матрицы по поверхности забоя генерируется тепловой поток трения и возникают высокие температуры. Вслед за сектором над этим же участком забоя проходит промывочный канал, через который движется холодный поток промывочной жидкости. Соответственно в призабойном слое горной породы возникают знакопеременные термомеханические напряжения, как показано в работе [2].

Учитывая что при импульсной подаче промывочной жидкости удастся создать значительные градиенты температуры на забое, то одним из факторов способствующих повышению эффективности разрушения горной породы могут быть знакопеременные температурные напряжения в призабойном слое горной породы, что приводит к ее разупрочнению.

Целью настоящей работы является построение приближенного решения задачи о развитии трещин в призабойном слое горной породы при бурении алмазными коронками с импульсным режимом промывки и анализ термоупругих эффектов в горной породе при тепловых граничных условиях третьего рода.

Постановка проблемы

Теория разрушения горных пород при охлаждении поверхности забоя была разработана в [3]. Однако представленные в указанной работе результаты ограничены случаем высокоинтенсивного процесса «нагрев–охлаждение» соответствующего тепловым граничным условиям первого рода. При бурении алмазными коронками целесообразно рассматривать тепловую задачу с более общими граничными условиями конвективного теплообмена (условия третьего рода). В тоже время данная задача при граничных условиях третьего рода не решалась в виду определенных математических трудностей.

Как известно механическая скорость бурения определяется соотношением

$$v = \frac{N}{A \cdot F},$$

где N – затрачиваемая мощность, A – энергоёмкость разрушения горной породы, F – площадь забоя.

В работе [4] доказано, что энергоёмкость разрушения идентична прочности горной породы и, таким образом, снижение прочности является показателем, с помощью которого можем оценить повышение эффективности процесса разрушения горной породы. Как показано в работах [2, 5], снижение прочности горной породы при попеременном воздействии высоких и низких температур обуславливается ростом естественных и искусственных микротрещин, выходящих на поверхность забоя. Количественно такое снижение прочности может быть оценено по формуле

$$\gamma = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{l_0}{l}}, \quad (1)$$

где l_0 – длина трещины до термоциклического воздействия; σ_0 – напряжение растяжения, раскрывающее трещину длиной l_0 ; l – длина трещины после термоциклического воздействия; σ – напряжение растяжения, раскрывающее трещину длиной l . При этом процесс раскрытия трещины начинается не сразу, а по истечении некоторого времени, называемого временем задержки. Переход трещины в равновесно-подвижное состояние определяется условием [6]

$$\pi N_0 > K,$$

где K – константа материала, характеризующая силы сцепления в породе и называемая модулем сцепления породы, N_0 – коэффициент интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины. В свою очередь КИН определяется как

$$N_0 = \frac{\sqrt{2l}}{\pi} \int_0^l \frac{\sigma \cdot \phi(x, \tau)}{\sqrt{l^2 - x^2}} dx, \quad (3)$$

$$\phi(x, \tau) = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \exp(hx + h^2 a\tau) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + h\sqrt{a\tau}\right), \quad (4)$$

где τ – время; a – температуропроводность горной породы; α – коэффициент теплоотдачи на поверхности забоя; λ – коэффициент теплопроводности породы

Решение уравнения (3) выполнено в работе [3] и получено соотношение, определяющее связь между временем задержки развития трещины и ее длиной при термическом воздействии на породу

$$\sqrt{\frac{1}{L}} = 1 - \frac{2L}{\pi^2 \sqrt{\tau'}} + \varphi, \quad (5)$$

где $L = l/l_*$ – безразмерная длина трещины; l_* – минимальная длина трещина, которая раскрывается напряжением σ ; $\tau' = \frac{\tau \cdot a}{l_*}$ – безразмерное время. Величину l_* можно получить из критерия Гриффитса [2]

$$\sigma_* = \frac{K\sqrt{2}}{\pi\sqrt{l_*}}. \quad (6)$$

Значение φ определяется

$$\varphi = \frac{2}{\pi} \exp(\operatorname{Bi}^2 \tau') \left(- \int_0^1 \frac{\exp(\operatorname{Bi} L \zeta)}{\sqrt{1 - \zeta^2}} d\zeta + \frac{L}{\sqrt{\pi \tau'}} \int_0^1 \frac{\exp(\operatorname{Bi} L \zeta) \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} d\zeta + \operatorname{Bi} \sqrt{\frac{\tau'}{\pi}} \int_0^1 \frac{\exp(\operatorname{Bi} L \zeta)}{\sqrt{1 - \zeta^2}} d\zeta \right), \quad (7)$$

где $Bi = \frac{\alpha l_*}{\lambda}$ – критерий Био; $\zeta = x/l_*$. Для случая граничных условий первого рода в тепловой задаче значение $\varphi = 0$. $\varphi \neq 0$. Вычисление значения φ требует вычисления входящих в (7) сингулярных интегралов, которые не имеют аналитического представления, а также осложняется присутствием экспоненты в положительной степени. Разложение функций $erfc$ и \exp в ряд в данном случае нецелесообразно, поскольку получающийся результат имеет плохую сходимость. Для удовлетворительного по точности расчета в данном случае нельзя ограничиться первыми членами ряда, требуется проведение дополнительных исследований и привлечения большого количества членов ряда, что делает этот подход неэффективным.

Построение методики исследования

Для анализа параметров разрушения при граничных условиях третьего рода воспользуемся подходом к расчету коэффициента интенсивности напряжений, предложенному в [7]. С использованием метода интегральных уравнений решена задача для краевой трещины в полуплоскости, находящейся под действием нелинейно распределенной нагрузки $\sigma(x)$.

Получено, что в случае, когда $\sigma(x)$ может быть представлена в виде

$$\sigma(x) = -\sigma \sum_{n=1}^{10} C_n \left(\frac{x}{l}\right)^n, \quad (8)$$

где C_0, C_1, \dots, C_{10} – произвольные константы; коэффициент интенсивности напряжений может быть приближенно определен по соотношению

$$N_0 = -\sigma \sqrt{2\pi l} (0.7930 C_0 + 0.4829 C_1 + 0.3716 C_2 + 0.3118 C_3 + 0.2735 C_4 + 0.2464 C_5 + 0.2260 C_6 + 0.2090 C_7 + 0.1968 C_8 + 0.1858 C_9 + 0.1765 C_{10}). \quad (9)$$

В нашем случае нагрузка $\sigma(x)$ имеет вид

$$\sigma(x) = -\sigma_* \phi(x, \tau), \quad (10)$$

где σ_* определяется в соответствии с (6), а ϕ в соответствии с (7). С учетом этого, а также используя введенные выше безразмерные переменные, можем переписать (10) в виде

$$\sigma(\xi, \tau') = -\sigma_* \left[erfc\left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau'}}\right) - \exp(Bi\xi + Bi^2 \tau') erfc\left(\frac{\xi}{2\sqrt{\tau'}} + Bi\sqrt{\tau'}\right) \right]. \quad (11)$$

Заменим функцию ϕ ее линейным приближением $\tilde{\phi}$ в виде

$$\tilde{\phi}(\xi, \tau') = 1 - \exp(Bi^2 \tau') erfc(Bi\sqrt{\tau'}) - 2erfc(2\sqrt{\tau'}) \exp(4\tau') \cdot \xi. \quad (12)$$

С учетом (12) можем переписать (11)

$$\sigma(\xi, \tau') = -\sigma_* \left[1 - \exp(Bi^2 \tau') erfc(Bi\sqrt{\tau'}) - 2erfc(2\sqrt{\tau'}) \exp(4\tau') \cdot \xi \right]. \quad (13)$$

Приравнявая (13) и (9) и ограничиваясь в (9) значением $n=1$, легко найти постоянные C_0 и C_1 . Таким образом, получим нелинейное уравнение, связывающее параметры L , τ' и Bi

$$\sqrt{\frac{1}{L}} = 0.895 \cdot A(\tau', Bi) - 0.545 \cdot B(\tau') \cdot L, \quad (14)$$

где $A(\tau', Bi) = 1 - \exp(Bi^2 \tau') erfc(Bi\sqrt{\tau'})$; $B(\tau') = -2erfc(2\sqrt{\tau'}) \exp(4\tau')$. Соотношение (14) является решением задачи о переходе трещины в равновесно-подвижное состояние при граничных условиях третьего рода на поверхности забоя, аналогично ранее полученному решению (5) для граничных условий первого рода.

Результаты исследований

На рис. 1 представлена зависимость безразмерного времени развития трещины от ее длины, полученная на основе решения (14) для различных чисел Bi . Исходя из определения

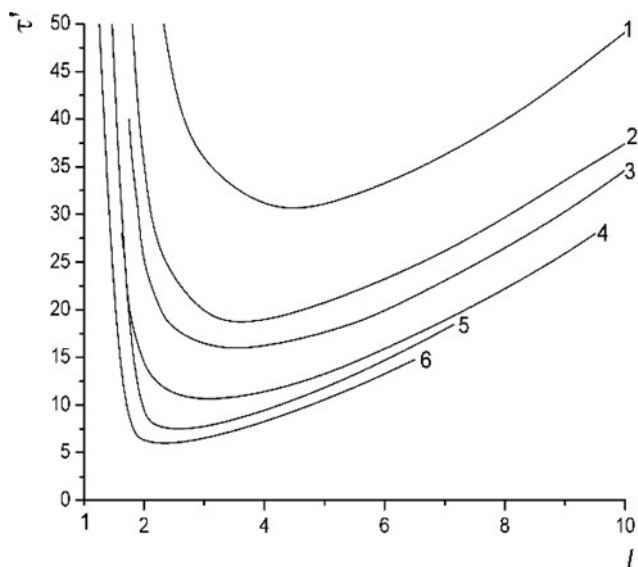


Рис. 1. Зависимость безразмерного времени разрушения τ' от длины трещины L для различных значений Bi : 1 – $Bi = 0,5$; 2 – $Bi = 1$; 3 – $Bi = 1,5$; 4 – $Bi = 2$; 5 – $Bi = 5$; 6 – $Bi \rightarrow \infty$ расчет по (5)

безразмерное время задержки составляет $\tau'_{\min} \approx 5,87$.

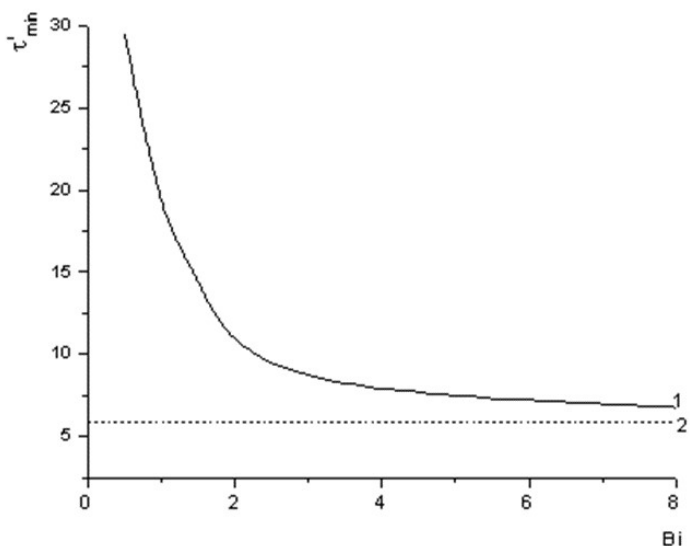


Рис. 2. Зависимость времени задержки начала разрушения τ'_{\min} от значения Bi

зависимость времени задержки τ'_{\min} от критерия Био, который характеризует интенсивность теплоотдачи на поверхности забоя. Как видим из представленных результатов при малых значениях $Bi < 2$ время задержки резко возрастает, что свидетельствует о недостаточном охлаждении забоя для интенсивного трещинообразования. При $Bi \geq 2$ время задержки разрушения приближаются к значениям, полученным для случая граничных условий 1 рода и решения (5).

величины трещины при $L < 1$ развиваться не будут. При $L > 1$, согласно рис. 1, кривая зависимости времени, необходимого для развития трещины от ее длины, имеет минимум.

Значение τ'_{\min} является временем задержки начала процесса роста трещины. По достижению $\tau' = \tau'_{\min}$, трещина начинает развиваться динамично и переходит к устойчивому росту. При этом скорость роста будет максимальна для трещины, которая начала свое движение, и замедляется по мере развития трещины. Функции $\tau'(L)$ достигает минимума при $L_{\min} = 2,25$, а минимальное

Анализ влияния интенсивности теплообмена (значения числа Bi) на время задержки начала разрушения и минимальную длину трещины. Как видим, чем меньше значения коэффициента теплоотдачи, тем больше требуется временной интервал для того, чтобы трещина перешла в подвижное состояние, и размер трещин, которые будут раскрываться при данном времени, также значительно увеличивается. С увеличением интенсивности теплообмена значение времени задержки смещается в сторону меньших трещин.

На рис. 2 показана

Таким образом, при разработке технологии импульсной промывки необходимо выбирать такие режимы подачи жидкости, при которых коэффициенты теплоотдачи обеспечивают как можно большие значения чисел Био.

Выводы

В работе впервые получено решение для задачи о развитии трещин в призабойном слое горной породы при бурении алмазными коронками при граничных условиях третьего рода. Исследовано влияние теплоотдачи на процесс развития трещинообразования при бурении с импульсной промывкой. Полученные результаты позволяют оценить влияние интенсивности теплоотдачи на забое на разупрочнение горной породы и определить значения параметров промывки, обеспечивающие эффективное термическое разупрочнение горной породы.

Розглянуто процеси зниження міцності гірської породи при бурінні алмазними буровими коронками за рахунок значного температурного градієнту при імпульсному промиванні. Одержаний наближений розв'язок задачі про розвивання тріщини у гірській породі для теплових граничних умов третього роду, що дозволяє досліджувати вплив інтенсивності теплообміну на механічний стан породи. Представлено результати розрахунку параметрів процесу руйнування при бурінні алмазними коронками для різних умов охолодження вибою.

Ключові слова: алмазне буріння, міцність породи, тріщиноутворення, імпульсне промивання.

THE EFFICIENCY OF DESTRUCTION OF ROCKS DURING DRILLING WITH PULSE WASHING

The rock strength reduction under drilling with diamond drill bits due to a significant temperature gradient during pulse flushing is described. An approximate solution of the problem of fractures development in the rock for the thermal boundary conditions of the third kind is obtained. It allows to investigation the effect of heat transfer on the mechanical condition of rock formation. The results of calculation of the parameters of the failure process during drilling with diamond crowns for different cooling conditions of the working face are presented.

Key words: diamond drilling, rock strength, fracturing, impulse flushing

Литература

1. Кожевников А. А., Н. Т. Филимоненко, Жикаляк Н. В. Импульсная промывка скважин. – Донецк: «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2010. – 275 с.
2. Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии / А. Н. Москалев, Е. Ю. Пигида, Л. Г. Керекелица и др. – К.: Наукова думка, 1987. – 248 с.
3. Разрушение горных пород при резком охлаждении / А. А. Кожевников, В. В. Крысан, Ю. Н. Вахалин и др. – Донецк: ТОВ «ЛизуновПрес», 2011. – 152 с.
4. Шехурдин В. К. Удельная энергоёмкость разрушения горных пород адекватна пределу прочности // Горная Промышленность. –1999. – № 6 – С. 55–59.
5. Rock formation thermal strength reduction study in the course of diamond core drilling using pulse flushing mode / A.Yu. Dreus, A.K. Sudakov, A.A. Kozhevnikov, Yu. N. Vakhalin // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2016.– №3.
6. Мухелишвили Н.И.. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука. Гл изд-во физ.мат. лит, 1966. – 708 с.
7. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений в 2-х томах. Т.1 / под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 448 с.

Поступила 08.06.16