

Т. Н. МЕНДЕБАЕВ, Н. Ж СМАШОВ, М. А. КОНАРБАЕВ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ
МАТРИЦЫ АЛМАЗНОЙ БУРОВОЙ КОРОНКИ**

The essence of the paper is in investigation of thermal field of matrix of diamond drill bit on contact with rocks. Mechanism of appearance of thermal field of matrix was described.

Arising of the main tensions and volumetric forces giving rise to temperature deformation and crack forming are described.

Mathematical relationships were received for calculation of coefficients of intensity of tensions and values of surface energy evolving when cracks forming. On their basis conclusions about decreasing of intensity of cracks forming were formulated. Results of investigations were the basis for choice of constructive schemes of diamond drill pit. The most optimal scheme of matrix is pilot and lagging sectors of bit with hydraulic chamber.

Статья посвящена исследованию природы появления и развития теплового поля матрицы алмазной буровой коронки в процессе бурения.

Тепловое поле вызывает растягивающие напряжения в матрице, которые со временем могут стать критическими при наличии даже малых дефектов в матрице и корпусе коронки, причиной хрупкого разрушения и развития трещин. При этом опасными будут трещины поперечного и продольного сдвигов, т. е. II и III видов, так как явные трещины нормального, вдоль вертикальной оси коронки, разрыва I вида, как показывает практический опыт, маловероятны [1].

Дополнительные температурные деформации считаются пропорциональными скачку температуры $\Delta t^0 = t_k^0 - t_0^0$, где t_0^0 , t_k^0 соответственно начальная и конечная температуры.

Для учета теплового воздействия на матрицу коронки необходимо найти относительную температурную деформацию $E_t = \alpha \Delta t$, где α – температурный коэффициент материала матрицы, град⁻¹. Температурная деформация изменит условие равновесия коронки при бурении и приведет к появлению дополнительной объемной силы $\beta(dt/dx)$, где $\beta = dE(1-2\mu)$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-механических характеристик материала матрицы; E , μ – соответственно модуль упругости при

растяжении-сжатии и коэффициент Пуассона материала матрицы; x – текущее значение продольной координаты (высоты матрицы); t – температура, меняющаяся по высоте матрицы и коронки в целом.

Когда матрица внедрится в породу забоя на всю свою высоту, тепловой поток в коронку будет поступать еще и с боковых поверхностей матрицы от работы подрезных алмазов. Тогда появится вторая дополнительная объемная сила, равная $2\beta(dt/d\rho)$, где ρ – текущее значение радиуса матрицы: $\tau \leq \rho \leq R$ при этом τ , R – соответственно внутренний и наружный радиусы матрицы.

Следовательно, матрица алмазной коронки испытывает сложное напряженное состояние, нагруженное не меняющимися вдоль образующей касательными напряжениями τ_{xz} и τ_{yx} (работа подрезных алмазов, когда $u = u(y, z)$, $v = \omega = 0$, u , v , ω – перемещения соответственно вдоль продольной оси x и диаметральных осей y , z), а также комбинацию осевого сжатия со сдвигом, где действует и боковое обжатие как проявление горного давления.

Если принять главные напряжения, определяющие боковое обжатие, равными друг другу, т. е. $\delta_2 = \delta_3$, то задача становится плоской и действие одного алмазного резца на забой будет зеркальным отражением действия того же резца на матрицу под нагрузкой, равной реакции забоя. Эта реакция забоя и определяет напряжения в матрице алмазной коронки и соответствующие им деформации (линейные и угловые), от величины которых зависят работоспособность коронки с учетом действия температурного фактора. Задача становится подобной задаче Фламмана, когда сосредоточенная сила (нагрузка на алмазное зерно) воздействует на полуплоскость единичной ширины. Этой полуплоскостью будем считать часть массива матрицы алмазной коронки, распространяющейся от резца влево, вправо и вверх. Другой полуплоскостью будет забой скважины также единичной ширины, где действует другая часть резца, вызывая напряжения в буримой породе (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что при действии осевой нагрузки S_a , передаваемой породе через алмазный резец, порода передает через тот же алмаз свою реакцию R_n , создавая при этом два круга напряжений в породе и матрице. При этом по контурам этих кругов действуют только главные напряжения δ_{ρ_m} и δ_{ρ_n} . Внутри кругов образуются как нормальные δ_x и δ_y , так и касательные τ_{xy} напряжения (см. рис. 1, б), которые могут стать причинами появления в матрице трещин сдвига II рода (по радиальным направлениям от действия напряжений δ_y и τ_{yx}) и III рода (по концентрическим окружностям на торце матрицы от действия напряжений δ_x и τ_{xy}).

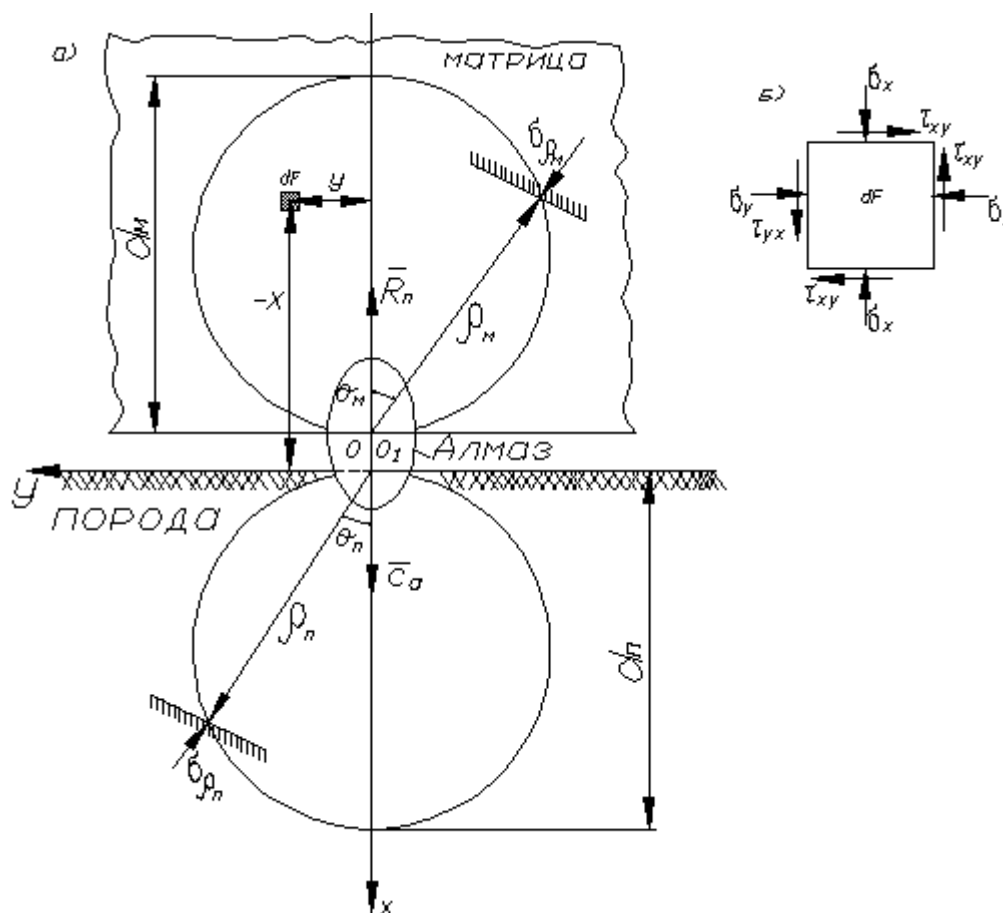


Рис. 1. Схемы распределения напряжений при работе алмазного резца. а – по окружностям главных напряжений в породе и матрице; б – в элементе dF – единичной толщины в матрице; $\theta_m, \theta_n; \rho_m, \rho_n$ – полярные координаты площадок с главными напряжениями δ_{ρ_m} и δ_{ρ_n} ; x, y – декартовы координаты элементарной площадки dF в матрице; τ_x, τ_y – нормальные напряжения; τ_{xy} ,

τ_{yx} – касательная напряжения; C_a – осевая нагрузка; R_n – реакция породы; d_M – высота матрицы; d_n – глубина распространения теплового поля в породе.

Величины напряжении δ_x , δ_y и τ_{xy} определенным образом связаны с главным напряжением $\delta_{\rho a}$ в матрице и могут быть представлены в следующем виде [2]:

$$\delta_x = \delta_{\rho a} \cos^2 \theta = -\frac{2R_n x^3}{n(x^2 + y^2)^2}; \quad (1)$$

$$\delta_y = \delta_{\rho a} \sin^2 \theta = -\frac{2R_n xy^2}{n(x^2 + y^2)^2}; \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \delta_{\rho a} \sin \theta \cos \theta = -\frac{2R_n x^2 y}{n(x^2 + y^2)^2}, \quad (3)$$

где величина угла θ определяется видом конструктивного исполнения коронки, а значение реакции забоя R_n можно найти из следующей зависимости:

$$R_n = n_0 \omega^{n_1} \nu^{n_2},$$

где n_0, n_1, n_2 – эмпирические коэффициенты.

К напряжениям, соответствующим выражениям (1)–(3), следует добавить и температурные напряжения, равные $\beta \Delta t_x^0$, где Δt_x^0 – перепад температур по высоте матрицы. К напряжениям на боковых поверхностях матрицы при действии подрезных алмазов добавляются свои температурные напряжения $2\beta \Delta t_\rho^0$, где Δt_ρ^0 – перепад температур на толщине матрицы.

Расчет температурных полей основывается на решении дифференциального уравнения теплопроводности [2]

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\lambda \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial t^0}{\partial x} \\ \frac{\partial t^0}{\partial \rho} \end{array} \right\} S, \quad (4)$$

где Q – количество теплоты, Дж/м², проходящее через некоторую площадку S ; t – время; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град); $\partial t^0 / \partial x, \partial t^0 / \partial \rho$ –

градиенты температуры соответственно по высоте матрицы и в ее стенке в радиальном направлении при известных условиях на боковых поверхностях.

Решение уравнения (4) зависит от выбора значений коэффициентов интенсивности напряжений, пропорциональных величине теплового потока, поступающего в тело матрицы алмазной коронки. В зависимости от типа трещин, образующихся в теле матрицы, эти коэффициенты имеют вид:

$$K_I = \frac{\alpha E \sqrt{\pi}}{4(1-\mu)\lambda} Q_T R \sqrt{R}; \quad (5)$$

$$K_{II} = \frac{\alpha E \sqrt{\pi}}{4(1-\mu)\lambda} Q_T \vartheta \sqrt{\vartheta}; \quad (6)$$

$$K_{III} = \frac{\alpha E \sqrt{\pi}}{4(1-\mu)\lambda} Q_T a \sqrt{a}, \quad (7)$$

где K_I, K_{II}, K_{III} – коэффициенты интенсивности напряжений в матрице соответственно для трещин нормального отрыва (по продольной оси коронки), поперечного сдвига (в радиальном направлении) и продольного сдвига (по концентричным окружностям на торце матрицы); Q_T – тепловой поток, Вт/м²; R, ϑ, a – соответственно радиус трещины отрыва, половина длины поперечного сдвига и половина длины продольного сдвига.

Как показывает статистика видов аномального износа алмазных коронок [3], трещины первого вида практически не встречаются, наиболее распространены трещины в матрице третьего типа и реже второго типа.

Зависимости (5)–(7) показывают, что интенсивность трещинообразования в матрице алмазной коронки определяется как величиной теплового потока, поступающего в матрицу, так и теплофизическими (α, χ) и упругими (E, μ) характеристиками материала матрицы: снижение величины коэффициента теплового расширения α при увеличении коэффициента теплопроводности λ , а также снижение упругих констант E и μ , т. е. выбор малоупругой матрицы, способствуют предупреждению или, по крайней мере, снижению интенсивности трещинообразования.

Следует заметить, что при образовании новых трещин и росте существующих развивается процесс выделения внутреннего тепла в самой матрице: растущая трещина становится источником тепловой энергии, равной

$$W_T = W_{ИИТ} \left\{ \frac{\sigma}{a} \right\},$$

где W_T – тепловая энергия трещинообразования, равная $W_{ИИТ}$ при развитии трещин II вида и $W_{ИИТ} a$ – трещин III вида; $W_{ИИТ}$ – интенсивность высвобождения упругой энергии.

Для развития пластической деформации и разрушения материала в малой зоне вблизи вершины трещины необходима соответствующая энергия:

$$W_p = W_T - W_{нов},$$

где W_p – энергия на пластическую деформацию и разрушение материала матрицы в малой зоне вблизи вершины трещины; $W_{нов}$ – обратимая поверхностная энергия, отводимая от зоны развития трещины.

В свою очередь, величина энергии $W_{нов}$ может быть определена следующим образом:

$$W_{нов} = 2A_{уд} \left\{ \frac{\sigma}{a} \right\},$$

где $A_{уд}$ – удельная работа разрушения для образования единицы площади новой поверхности, коэффициент 2 в правой части формулы показывает, что поверхностная энергия присутствует на обоих берегах трещины.

Между величинами поверхностной энергии и коэффициентов интенсивности трещинообразования от действия температурного фактора прослеживается определенная математическая зависимость, которую для трещин произвольного вида можно записать следующим образом [3]:

$$W_{нов} = \frac{1-\mu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\mu}{E} K_{III}^2. \quad (8)$$

Как было показано ранее, трещины первого вида случаются чрезвычайно редко, поэтому из формулы (8) можно исключить величину K_I . Тогда после

преобразований с учетом зависимостей (5)–(7) получим окончательный вид зависимости:

$$W_{\text{ИИГ}} = \frac{\alpha^2 E \pi Q_T^2}{16(1-\mu)\lambda^2} [a^3(1-\mu) + \varepsilon^3] \text{ Дж/м}^2. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что трещины II вида (поперечного сдвига в радиальном направлении) дают больший вклад в интенсивность высвобождения упругой энергии, чем трещины III вида (концентрические трещины на торце матрицы), так как коэффициент при a^3 меньше единицы: $1 - \mu < 1$, отсюда вытекает необходимость повышения прочности коронок в радиальном направлении.

Анализ расчетов по приведенной здесь методике показал, что трещинообразование в матрице возможно при условиях, когда:

$W_{\text{ИИГ}}$ – достигает критического значения $W_k = \text{const}$;

коэффициент интенсивности напряжений при механико-тепловом образовании трещин в матрице алмазной коронки также достигает критического значения $K_k = \text{const}$.

Величины W_k и K_k определяют вязкость разрушения, так как трещина начинает расти при достижении критериев:

$$W_{\text{ИИГ}} = W_k, K_{\text{I,II,III}} = K_k.$$

Однако эти критерии справедливы для идеально упругого деформирования, на практике же для реальных материалов используют так называемую пластическую поправку Ирвина:

$$r_y = K_k^2 / (2\pi\sigma_T^2),$$

где δ_m – предел текучести материала матрицы.

Для оценки влияния пластичной зоны у вершин- трещин в формулах для K_i следует заменить полудлину трещины на ее значение с добавлением r_y .

Анализ приведенных зависимостей позволил сформулировать мероприятия по предупреждению или снижению интенсивности трещинообразования в матрицах алмазных коронок:

снижение величины поступающего в матрицу теплового потока за счет уменьшения площади матрицы изменением порядка расположения составляющих ее секторов;

выбор материала для связки в матрице коронки, обладающего низкими значениями модуля упругости при растяжении – сжатии и коэффициентом повышенной теплопроводности.

На этой основе была выбрана матрица алмазной буровой коронки, где пилотная *1* и отстающая части *2* матрицы выполнены отдельно в виде отдельных секторов, расположенных с чередованием в шахматном порядке. При этом пилотные сектора смещены относительно среднего диаметра матрицы внутрь, а отстающие смещены к периферии и образуют гидравлические камеры *3*, соединенные с промывочными пазами *4* (рис. 2).

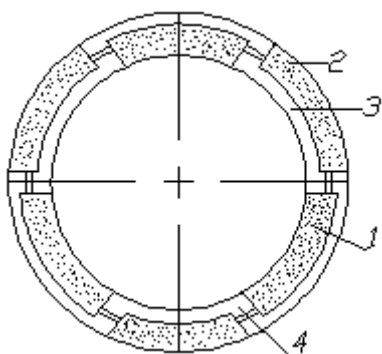


Рис. 2. Матрица алмазной буровой коронки. *1* – пилотные сектора; *2* – отстающая часть; *3* – гидравлические камеры; *4* – промывочные пазы

Конструкция буровой коронки защищена патентами на изобретения Республики Казахстан №8431 и Российской Федерации №2203381 (4 и 5).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Яковлев А.А.* Расчет коэффициента теплопроводности матриц алмазных коронок // Сборник научных трудов. М.: ВПО «Союзгеотехника», 1986. С. 18-22.

2. *Гинзбург И.М., Оношко Ю.А.* Методы выбора конструктивных параметров алмазного породоразрушающего инструмента. М.: ВИЭМС, 2003. С. 33-36.

3. *Горшков Л.К., Мендебаев Т.Н.* Бурение скважин с гидроизвлечением съемного керноприемника. М.: Недра, 1994. С. 95-99.

4. *Мендебаев Т.Н.* Патент Республики Казахстан № 8431. Алмазная буровая коронка. Бюл. №2. 16.02.2004.

5. *Мендебаев Т.Н.* Патент Российской Федерации № 2203381. Алмазная буровая коронка. Бюл. №12. 27.04.2003.