УДК 622.243.3

Л.К.ГОРШКОВ, *д-р техн. наук, профессор, spmi@mail.wplus.net*
В.Г.ГОРЕЛИКОВ, *д-р техн. наук, профессор, spmi@mail.wplus.net*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

L.K.GORSHKOV, *Dr. in eng. sc., professor, spmi@mail.wplus.net*
V.G.GORELIKOV, *Dr. in eng. sc., professor, spmi@mail.wplus.net*
National Mineral Resources University (University of Mines), Saint Petersburg

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ПОРОДАХ ЗАБОЯ СКВАЖИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ БУРОВЫХ РЕЗЦОВ

Рассмотрен механизм образования трещин круглого замкнутого очертания при действии на породу единичного бурового резца. Исследованы напряжения, возникающие на забое скважины. Даны рекомендации по конструированию буровых коронок.

***Ключевые слова*:** порода, забой скважины, буровые резцы; естественные, растягивающие, сжимающие, главные напряжения.

FORMATION OF CRACKS IN BREEDS OF THE FACE OF THE CHINK UNDER THE INFLUENCE OF CHISEL CUTTERS

It is considered the mechanism of formation of cracks of the round closed outline at action on breed of an individual chisel cutter. Pressure hinks arising on a face are investigated. Recommendations about designing of chisel crowns are made.

***Key words*:** breed, a chink face, chisel cutters; natural, stretching, compressing, main pressure.

Механизм образования трещин в породах забоя бурящейся скважины в общих чертах известен и приводится во многих работах. Одна из версий этого механизма изложена в монографии [1], но, тем не менее, существуют некоторые неясности, не позволяющие принять имеющиеся представления для практического использования. Попытаемся раскрыть детали механизма образования трещин круглого замкнутого очертания при действии на породу единичного бурового резца.

В основе решения такой задачи лежит понятие о возможном перераспределении напряжений, наведенных на контуре указанной выше круглой трещины. Пусть породный массив, в котором действуют естественные напряжения от горного давления P_x, P_y, P_z по трем взаимно перпендикулярным направлениям (осям декартовых координат), ослаблен круглой трещиной некоторого радиуса a, образованной от вдавливания в породу бурового резца. Возьмем на контуре трещины произвольную точку O_K и с ней свяжем новую (цилиндрическую) систему координат $O_{i\lambda}\rho\theta$ (рис.1). Размещение напряжений (естественных и наведенных) на контуре этой трещины напоминает систему напряжений при разрывных нарушениях сдвигового типа в тектонических зонах земной коры [2].

При вдавливании резца в породу соотношение естественных напряжений имеет следующий вид: $P_x = P_y = 0{,}33P_z$ при коэффициенте Пуассона для пород $\mu = 0{,}25$, для единичной осевой нагрузки на буровой резец наведенные напряжения на контуре круглой трещины распределяются следующим образом:

$$\sigma_\rho = \frac{1}{4\sqrt{2\pi\rho}} \times$$

$$\times\left[k_1\left(5\cos\frac{\theta}{2}-\cos\frac{3\theta}{2}\right)+k_{11}\left(-5\sin\frac{\theta}{2}+3\sin\frac{3\theta}{2}\right)\right];$$

$$\sigma_\theta=\frac{1}{4\sqrt{2\pi\rho}}\times$$

$$\times\left[k_1\left(\sin\frac{\theta}{2}+\sin\frac{3\theta}{2}\right)+k_{11}\left(\cos\frac{\theta}{2}+3\cos\frac{3\theta}{2}\right)\right];$$

$$\sigma_\lambda=\mu\left(\sigma_\rho+\sigma_\theta\right);\quad \tau_{\theta\lambda}=\frac{k_{111}}{\sqrt{2\pi\rho}}\cos\frac{\theta}{2};$$

$$\tau_{\rho\lambda}=\frac{k_{111}}{\sqrt{2\pi\rho}}\sin\frac{\theta}{2};$$

$$\tau_{\rho\theta}=\frac{1}{4\sqrt{2\pi\rho}}\times$$

$$\times\left[k_1\left(\sin\frac{\theta}{2}+\sin\frac{3\theta}{2}\right)+k_{11}\left(\cos\frac{\theta}{2}+3\cos\frac{3\theta}{2}\right)\right];$$

$$k_1=2\sigma_\lambda\sqrt{\frac{a}{\pi}};\quad k_{11}=4\sqrt{a}\cos\varphi\frac{1}{(2-\mu)\sqrt{\pi}};$$

$$k_{111}=4\tau_{\theta\lambda}\sqrt{a}\sin\varphi\frac{1-\mu}{(2-\mu)\sqrt{\pi}};\quad \varphi=\frac{\pi}{2}-\theta,$$

где $\sigma_\rho,\sigma_\theta,\sigma_\lambda$ – нормальные напряжения соответственно в направлениях ρ (радиальном), θ (тангенциальном) и λ (продольном); $\tau_{\theta\lambda},\tau_{\rho\theta},\tau_{\rho\lambda}$ – касательные напряжения в соответствующих плоскостях координатной системы $O_{k\lambda}\rho\theta$: k_1,k_{11},k_{111}: – коэффициенты интенсивности напряжений для трещин соответственно продольного (вдоль оси резца) и оперящих последнюю в поперечном (по радиусу ρ) и тангенциальном (по оси θ) направлениях; при этом следует заметить, что касательные напряжения на рис.1 не показаны, чтобы излишне не загромождать схему.

Так как на забой скважины действуют одновременно несколько резцов буровой коронки, то поле напряжений в породе забоя определяется как сумма напряжений от каждой из трещин и всех точек приложения резцов, при этом главные напряжения и их направляющие косинусы определяются по известной методике из курса теории упругости применительно к разведочному бурению [1, 3].

Главные напряжения находятся путем раскрытия определителя из коэффициентов y направляющих косинусов для напряжений, соответствующих граничным условиям нагружения породы под буровым резцом. Раскрыв этот определитель, получим кубическое уравнение, решив которое найдем искомые главные напряжения $\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$. Определитель имеет следующий вид:

$$\Delta=\begin{vmatrix}\sigma_\rho-\sigma, & \tau_{\rho\theta}, & \tau_{\rho\lambda}\\ \tau_{\theta\rho}, & \sigma_\theta-\sigma, & \tau_{\theta\lambda}\\ \tau_{\lambda\rho}, & \tau_{\lambda\theta}, & \sigma_\lambda-\sigma\end{vmatrix}=0,$$

где σ – неизвестное главное напряжение.

Кубическое уравнение для нахождения главных напряжений:

$$\sigma^3-\sigma^I\sigma^2+\sigma^{II}\sigma-\sigma^{III}=0$$

где $\sigma^I,\sigma^{II},\sigma^{III}$ – инварианты тензора напряжений на контуре трещины,

$$\sigma^I=\sigma_\rho+\sigma_\theta+\sigma_\lambda=\text{const};$$

$$\sigma^{II}=\sigma_\rho\sigma_\theta+\sigma_\rho\sigma_\lambda+$$

$$+\sigma_\theta\sigma_\lambda-\tau_{\rho\theta}^2-\tau_{\rho\lambda}^2-\tau_{\theta\lambda}=\text{const};$$

$$\sigma^{III}=\sigma_\rho\sigma_\theta\sigma_\lambda+$$

$$+2\tau_{\rho\theta}\tau_{\rho\lambda}\tau_{\theta\lambda}-\sigma_\rho\tau_{\rho\theta}^2-\sigma_\theta\tau_{\rho\lambda}^2-\sigma_\lambda\tau_{\theta\lambda}^2=\text{const}.$$

Направляющие косинусы главных напряжений определяются решением следующей системы уравнений:

$$\left(\sigma_\rho-\sigma_i\right)\frac{l_i}{n_i}+\tau_{\rho\theta}\frac{m_i}{n_i}=-\tau_{\rho\lambda};$$

$$\tau_{\theta\rho}\frac{l_i}{n_i}+\left(\sigma_\theta-\sigma_i\right)\frac{m_i}{n_i}=-\tau_{\theta\lambda};$$

$$l_i^2+m_i^2+n_i^2=1,\ i=1,2,3,\ldots,$$

где σ_i – одно из значений главных напряжений; l_i,m_i,n_i – направляющие косинусы

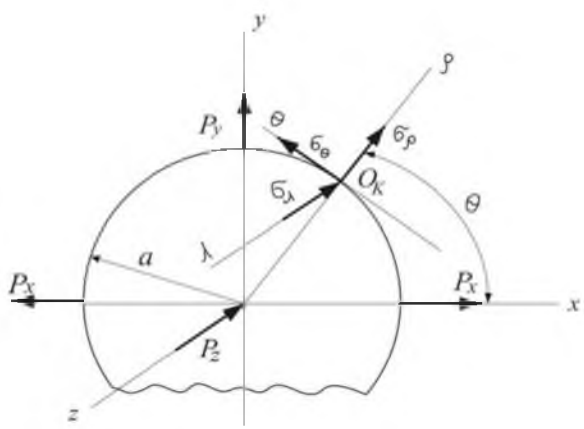


Рис.1. Системы координат, естественные напряжения (P_x, P_y, P_z), наведенные напряжения в т. O_K ($\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_\lambda$) на контуре круглой трещины вдавливания радиуса a: ось λ вертикальна и параллельна z, оси ρ и θ располагаются в горизонтальной плоскости, как и оси x, y

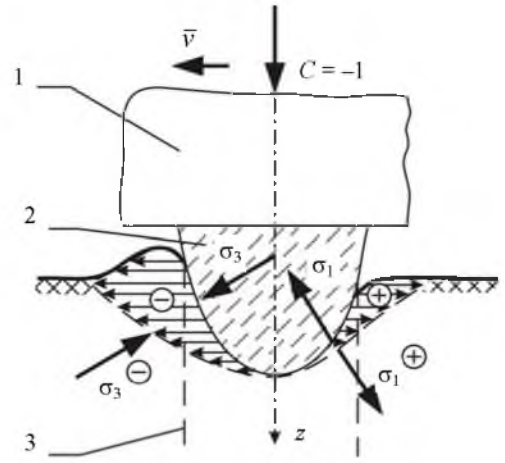


Рис.2. Зоны сжатия (–) и растяжения (+) при перемещении по забою вдавленного в него алмазного резца при единичной нагрузке C = –1: 1 – матрица коронки; 2 – алмазный резец; 3 – контур круглой трещины вдавливания; σ_1, σ_3 – главные напряжения; v – скорость горизонтального перемещения резца вдоль забоя бурящейся скважины

соответствующих главных напряжений; при этом $\frac{l_i}{n_i} = a_i$; $\frac{m_i}{n_i} = b_i$.

Решив приведенную систему относительно a_i и b_i, найдем значения направляющего косинуса n_i

$$n_i = \pm\sqrt{\frac{1}{1 + a_i^2 + b_i^2}},$$

а затем $l_i = a_i n_i$, $m_i = b_i n_i$.

Расчеты по приведенной выше методике показали высокую концентрацию сжимающих напряжений в породе вблизи фронтальной части резца (главное напряжение σ_3) и растягивающих напряжений (главное напряжение σ_1) сзади тыльной части резца (рис.2). При этом направление главного напряжения σ_3 составляет угол около 30° с горизонтальной поверхностью, а σ_1 – такой же угол с вертикалью, что согласуется с результатами исследования эволюции разрывных нарушений в породной толще [2]. Второе главное напряжение σ_2 (на фасадной проекции резца, рис.2) отсутствует, то есть $\sigma_2 = 0$ в этом направлении действуют только силы трения резца при его перемещении вдоль берегов образовавшейся трещины вдавливания.

Действие всех напряжений (естественных и наведенных), а также контактной силы трения способствует развитию оперяющих и секущих трещин относительно контура основной круглой трещины, что ведет к значительному ослаблению прочности буримого массива, при этом главную роль играет чередование сжатых и растянутых зон на забое в процессе перемещения вдавленных в породу осевой нагрузкой буровых резцов, например, алмазных.

Развитие растягивающего главного напряжения σ_1 вызывает отрывы отдельных частиц породы от массива с образованием в нем поперечно-тангенциальных трещин горизонтально-вертикальной ориентации, то есть трещин II и III порядков, облегчающих сдвиговые деформации на забое. При трещинообразовании такого рода в вершинах трещин накапливается тепловая энергия, но при подаче очистного агента на забой повышение температуры гасится, в общем, мало содействуя разупрочнению породы, что, тем не менее можно наблюдать при использовании малотеплоемких очистных агентов, например, сжатого воздуха. Действующие главные напряжения (см. рис.2) определяются по известной из курса сопротивления материалов зависимости для плоской задачи, в нашем случае в плоскости xoy или $\rho O_k \theta$ (см. рис.1):

$$\sigma_{1,3} = \frac{1}{2}\left[\sigma_\rho + \sigma_\theta \pm \sqrt{\left(\sigma_\rho - \sigma_\theta\right)^2 + 4\tau_{\theta\rho}^2}\right].$$

Таким образом, при конструировании алмазных породоразрушающих инструментов нового поколения следует обратить особое внимание на необходимость обеспечения появления на забое чередующихся зон растяжения и сжатия породы, поэтому конструкция коронки при ее работе на забое должна в максимально возможной мере способствовать развитию в буримой породе не только сжимающих и сдвиговых, но и растягивающих напряжений, возникающих после смещения резца в столбике сжатой породы за счет высвобождения потенциальной энергии упругой деформации указанного выше столбика сжатой резцом породы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Горшков Л.К.* Температурные режимы алмазного бурения / Л.К.Горшков, В.Г.Гореликов // М.: Недра, 1992.

2. *Лир Ю.В.* Строение и эволюция рудовмещающих разрывах нарушений сдвигового типа / Ю.В.Лир, С.С.Шакин // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. М.: Наука, 1991.

3. *Горшков Л.К.* Основы теории упругости и пластичности в разведочном бурении. СПб, 1992.

REFERENCES

1. *Gorchkov L.K.* Temperature modes of diamond drilling / L.K.Gorschkov, V.G.Gorelikov // M.: Bowels, 1992.

2. *Lir J.V.* Structure and evolution ruptures of infringements of shift tectonic infringements and their role in formation of mineral deposits / J.V.Lir, S.S.Shakin. Moscow: The Science, 1991.

3. *Gorschkov L.K.* The theory of elasticity and plasticity in drilling. Saint Petersburg, 1992.