

УДК 622.1/2

**МЕХАНИЗМ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ
ОСЛАБЛЕННОГО МИКРОТРЕЩИНАМИ
ВМЕЩАЮЩЕГО ПОРОДНОГО МАССИВА
ВОКРУГ ГЛУБИННЫХ ТОННЕЛЕЙ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ**

Циопин Чжоу^{1,2}, Циу Цянь^{1,3,4}

¹Школа гражданского строительства, Университет Чонкин, Chongqing 400045, China

²Главная лаборатория новых технологий строительства городов в горных районах,
Университет Чонкин, Министерство образования Китая, Chongqing 400045, PR China

³Университет науки и технологий PLA, Nanjing 210007, China

⁴Государственная главная лаборатория превентации катастрофических событий
и ослабления последствий взрывов и техногенных воздействий,
Университет науки и технологий PLA, Nanjing 210007, China

В рамках неевклидовой модели описания деформированного состояния массива пород вокруг глубинных тоннелей круглого сечения разработана математическая модель явления зональной дезинтеграции с учетом стадийности трещинообразования, характеризуемой параметром нарушенности горного массива, связанного с длиной и плотностью микротрещин. Получены расчетные формулы и кривые, иллюстрирующие данное явление.

Подземный тоннель, явление зональной дезинтеграции, неевклидова модель, нарушенность массива

ВВЕДЕНИЕ

Развитие строительства подземных конструкций на большой глубине неизбежно обостряет актуальность проблемы разрушения глубокозалегающего породного массива. Для глубинных породных массивов (в отличие от мелкозалегающих) в сложных геологических условиях высокого локального напряжения, высокой температуры, высокого давления воды и инженерных нарушений характерны нарушения и несовместные значительные деформации. В процессе проходки тоннеля в глубокозалегающем породном массиве встречаются зоны трещиноватости и нетрещиноватости вокруг тоннеля. Исследователи называют это явление зональной дезинтеграцией [1–4]. Зональная дезинтеграция — типичное проявление разрушения глубинного породного массива. Предпринимались многократные попытки понять его. Натурные исследования во вмещающем породном массиве вокруг тоннелей позволили получить надежную информацию о явлении зональной дезинтеграции [5–7]. На основании несовместной деформации породного массива построена неевклидова модель вмещающего породного массива вокруг тоннелей круглого сечения в условиях гидростатического давления [8–10]. Данная модель ис-

Работа выполнена при поддержке Китайского национального фонда естественных наук (проекты № 51021001, 51078371 и 51279218).

пользовалась в [11] для описания зональной дезинтеграции в условиях негидростатического сжатия. Помимо этого, на основе разрывной и несовместной деформации породных массивов авторы разработали новую неевклидову континуальную модель зональной дезинтеграции вмещающего породного массива вокруг глубинного тоннеля круглого сечения в условиях негидростатического давления [11]. Механизм зональной дезинтеграции вмещающего породного массива исследован с использованием энергетического критерия [12]. Влияние осевого локального напряжения на зональную дезинтеграцию вмещающих породных массивов изучено с помощью неевклидовой модели в [13]. Механизм зональной дезинтеграции в трансверсально-анизотропном породном массиве вокруг глубинного тоннеля круглого сечения установлен с помощью неевклидовой континуальной модели [14]. По мнению авторов, еще не изучено влияние нарушенности горного массива на явление зональной дезинтеграции вмещающего породного массива вокруг глубинного круглого тоннеля. В настоящей работе представлено исследование влияния нарушенности, индуцированной дефектами, на поле напряжений в глубинном породном массиве, а также на механизм зональной дезинтеграции.

1. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ЗОНЫ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

В исследованиях сделано предположение, что глубинный круглый тоннель радиусом r_0 пройден в массиве с горизонтальными и вертикальными напряжениями σ_h , σ_v (рис. 1).

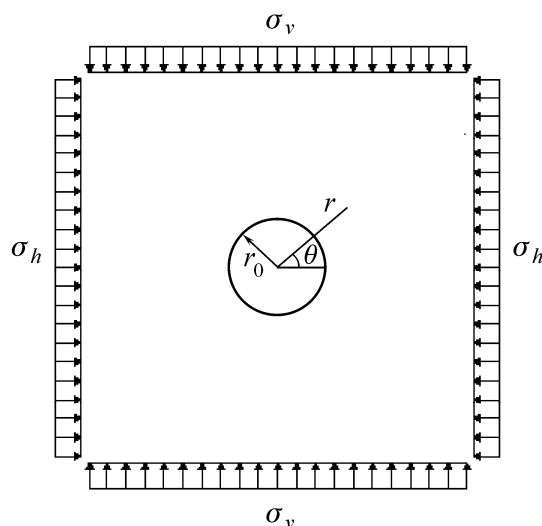


Рис. 1. Тоннель круглого сечения в глубинном породном массиве

В процессе изучения нарушенности на зональную дезинтеграцию глубинного породного массива необходимо установить зависимость между эволюцией микротрещин и эволюцией нарушения породы. Исследователи использовали такую зависимость, полученную в работах [15–18]. Стадия, предшествующая росту микротрещин, называется упругой фазой деформирования горной породы, а стадия роста микротрещин и стабильный рост вторичных трещин — фазами нелинейного деформирования породы. Стадия нестабильного распространения вторичных микротрещин соответствует фазе деформационной пластификации породы [15–18]. Выделено три стадии развития зональной дезинтеграции во вмещающем породном массиве, ослабленном микротрещинами: рост микротрещин, стабильное распространение вторичных микротрещин, нестабильный рост и слияние вторичных микротрещин с формированием макротрещин.

1.1. Стадия роста микротрещин

Предположим наличие равномерного распределения микротрещин при их исходной длине $2c_0$, установленной мезоскопически. Конечная полудлина микротрещин в процессе роста составит c_1 , а жесткость трещины — K'_{IC} . В результате проходки тоннеля в глубокозалегающем породном массиве микротрещины растут, а механическое поведение глубинных породных массивов характеризуется разрывной несовместной деформацией. В данном случае классическая упругопластическая теория уже не работает. Распределение напряжений во вмещающем породном массиве после начала роста микротрещин можно проанализировать с помощью неевклидовой модели. На основе неевклидовой теории Гузева [10] и метода Мори–Танака [19] выражение для главных напряжений можно записать в виде

$$\sigma'_1 = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}^2}, \quad (1)$$

$$\sigma'_2 = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}^2},$$

где $\sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2}$; $\sigma_\theta = \sigma_{\theta1} + \sigma_{\theta2}$; $\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta1} + \tau_{r\theta2}$; σ_{r1} , $\sigma_{\theta1}$, $\tau_{r\theta1}$ — упругие напряжения; σ_{r2} , $\sigma_{\theta2}$, $\tau_{r\theta2}$ — самоуравнивающиеся напряжения [20];

$$\sigma_{r1} = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \left(1 - 4\frac{r_0^2}{r^2} + 3\frac{r_0^4}{r^4}\right) \cos 2\theta;$$

$$\sigma_{r2} = \frac{E}{2\gamma^{3/2}(1-\nu^2)r} [AJ_1(\gamma^{1/2}r) + BN_1(\gamma^{1/2}r) + CK_1(\gamma^{1/2}r)] +$$

$$+ \frac{E}{2(1-\nu^2)r\gamma^{3/2}} [A_1J_1(\gamma^{1/2}r) + B_1N_1(\gamma^{1/2}r) + C_1K_1(\gamma^{1/2}r)] \cos 2\theta - \frac{3E}{(1-\nu^2)r^2\gamma^2} \times$$

$$\times [A_1J_2(\gamma^{1/2}r) + B_1N_2(\gamma^{1/2}r) + C_1K_2(\gamma^{1/2}r)] \cos 2\theta;$$

$$\sigma_{\theta1} = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \left(1 + 3\frac{r_0^4}{r^4}\right) \cos 2\theta;$$

$$\sigma_{\theta2} = -\frac{E}{2\gamma(1-\nu^2)} [AJ_0(\gamma^{1/2}r) + BN_0(\gamma^{1/2}r) - CK_0(\gamma^{1/2}r)] +$$

$$+ \frac{E}{2\gamma^{3/2}(1-\nu^2)r} [AJ_1(\gamma^{1/2}r) + BN_1(\gamma^{1/2}r) + CK_1(\gamma^{1/2}r)] +$$

$$+ \frac{E}{2(1-\nu^2)\gamma} [A_1J_0(r\sqrt{\gamma}) + B_1N_0(r\sqrt{\gamma}) + C_1K_0(r\sqrt{\gamma})] \cos 2\theta - \frac{3E}{2r(1-\nu^2)\gamma^{3/2}} [A_1J_1(r\sqrt{\gamma}) +$$

$$+ B_1N_1(r\sqrt{\gamma}) + C_1K_1(r\sqrt{\gamma})] \cos 2\theta + \frac{3E}{r^2(1-\nu^2)\gamma^2} [A_1J_2(r\sqrt{\gamma}) + B_1N_2(r\sqrt{\gamma}) + C_1K_2(r\sqrt{\gamma})] \cos 2\theta;$$

$$\tau_{r\theta1} = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \left(1 + 2\frac{r_0^2}{r^2} - 3\frac{r_0^4}{r^4}\right) \sin 2\theta;$$

$$\tau_{r\theta 2} = \frac{E}{r(1-\nu^2)\gamma^{3/2}} [A_1 J_1(r\sqrt{\gamma}) + B_1 N_1(r\sqrt{\gamma}) + C_1 K_1(r\sqrt{\gamma})] \sin 2\theta - \frac{3E}{r^2(1-\nu^2)\gamma^2} \times$$

$$\times [A_1 J_2(r\sqrt{\gamma}) + B_1 N_2(r\sqrt{\gamma}) + C_1 K_2(r\sqrt{\gamma})] \sin 2\theta;$$

$$\gamma^2 = \frac{3\beta[3\lambda_2(1-D_2)^2 + 2\mu_2(1-D_3)^2](1-\alpha)}{2[3\lambda_2(1-D_2)^2(1-\alpha) + 2\mu_2(1-D_3)^2(3-\alpha)]}, \quad \beta = \frac{\mu_2}{\mu_3}, \quad \alpha = \frac{3g^2(1-D_0)^2(1-D_2)^2}{\delta},$$

$$\delta = [\lambda_1(1-D_0)^2 + 2\mu_1(1-D_1)^2][3\lambda_2(1-D_2)^2 + 2\mu_2(1-D_3)^2];$$

$$D_0 = \frac{\pi\omega_0}{1+\pi\omega_0}, \quad D_1 = \frac{\pi\omega_0}{1+\nu_0+\pi\omega_0}, \quad \omega_0 = \eta_0 c_0^2; \quad D_2 = \frac{\pi\omega_0}{1+\pi\omega_0}, \quad D_3 = \frac{\pi\omega_0}{1+\nu_1+\pi\omega_0};$$

$$\nu_0 = \frac{\lambda_1}{2(\lambda_1 + \mu_1)}, \quad \nu_1 = \frac{\lambda_2}{2(\lambda_2 + \mu_2)}, \quad \nu = \frac{\lambda_2(1-D_2)^2}{2[\lambda_2(1-D_2)^2 + \mu_2(1-D_3)^2]};$$

$$E = \frac{\mu_2[3\lambda_2(1-D_2)^2 + 2\mu_2(1-D_3)^2](1-D_3)^2}{\lambda_2(1-D_2)^2 + \mu_2(1-D_3)^2}; \quad \lambda_1, \mu_1 — \text{параметры Ламе, соответствующие гео-$$

метрии евклидоваго пространства; λ_2, μ_2 — параметры Ламе, соответствующие внутренней геометрии породного материала; g и μ_3 — феноменологические параметры; r_0 — радиус тоннеля; (r, θ) — полярные координаты; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; σ_v — вертикальное локальное напряжение; σ_h — горизонтальное локальное напряжение; η_0 — плотность микротрещин; c_0 — полудлина микротрещин; C совпадает с детерминантом вронскиана для линейно независимых решений $J_0(\sqrt{\gamma}r)$ и $N_0(\sqrt{\gamma}r)$; J_0, N_0 и K_0 — цилиндрические функции Бесселя, Неймана, Макдональда нулевого порядка. Детерминант C_1 совпадает с детерминантом вронскиана для линейно независимых решений J_2 и N_2 , которые гарантируют единственность решения; J_1, N_1 и K_1, J_2, N_2 и K_2, J_3, N_3 и K_3 — цилиндрические функции первого, второго и третьего порядка. Параметры A, B, A_1 и B_1 записываются так:

$$A = (C/2)\pi\sqrt{\gamma}r_0[K_0(\sqrt{\gamma}r_0)N_1(\sqrt{\gamma}r_0) - K_1(\sqrt{\gamma}r_0)N_0(\sqrt{\gamma}r_0)];$$

$$B = -(C/2)\pi\sqrt{\gamma}r_0[K_0(\sqrt{\gamma}r_0)J_1(\sqrt{\gamma}r_0) - K_1(\sqrt{\gamma}r_0)J_0(\sqrt{\gamma}r_0)];$$

$$A_1 = (C_1/2)\pi\sqrt{\gamma}r_0[K_2(\sqrt{\gamma}r_0)N_3(\sqrt{\gamma}r_0) - K_3(\sqrt{\gamma}r_0)N_2(\sqrt{\gamma}r_0)];$$

$$B_1 = -(C_1/2)\pi\sqrt{\gamma}r_0[K_2(\sqrt{\gamma}r_0)J_3(\sqrt{\gamma}r_0) - K_3(\sqrt{\gamma}r_0)J_2(\sqrt{\gamma}r_0)].$$

Напряжения растяжения на поверхности микротрещин:

$$\sigma'_i = \sigma'_2 + f(c_0)S'_2, \quad (2)$$

$$S'_2 = \sigma'_2 - (\sigma'_1 + \sigma'_2)/2, \quad (3)$$

где $f(c_0) = d/c_0$; d — диаметр зерен породы; σ'_i — напряжение растяжения на поверхности микротрещин.

Коэффициент интенсивности напряжения для модели 1 (модель роста микротрещин):

$$K_I = -[\sigma'_2 + f(c_0)S'_2] \sqrt{2d_i \tan\left(\frac{\pi c_0}{2d_i}\right)}, \quad (4)$$

где d_i — расстояние между микротрещинами, определенное мезоскопически.

Критическим условием для роста микротрещин по поверхности раздела является равенство

$$K_I = K'_{IC}. \quad (5)$$

Рост микротрещин инициируется, когда коэффициент интенсивности напряжения в вершине трещины удовлетворяет критическому условию (5). Полудлина выросших микротрещин составляет c_1 .

При этом поле напряжений во вмещающем массиве вокруг глубинного тоннеля определяется как

$$\sigma'_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r3}, \quad (6)$$

$$\sigma'_\theta = \sigma_{\theta1} + \sigma_{\theta3}, \quad (7)$$

$$\tau'_{r\theta} = \tau_{r\theta1} + \tau_{r\theta3}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \sigma_{r3} &= \frac{E}{2\gamma_1^{3/2}(1-\nu^2)r} [AJ_1(\gamma_1^{1/2}r) + BN_1(\gamma_1^{1/2}r) + CK_1(\gamma_1^{1/2}r)] + \\ &+ \frac{E}{2(1-\nu^2)r\gamma_1^{3/2}} [A_1J_1(\gamma_1^{1/2}r) + B_1N_1(\gamma_1^{1/2}r) + C_1K_1(\gamma_1^{1/2}r)] \cos 2\theta - \frac{3E}{(1-\nu^2)r^2\gamma_1^2} \times \\ &\times [A_1J_2(\gamma_1^{1/2}r) + B_1N_2(\gamma_1^{1/2}r) + C_1K_2(\gamma_1^{1/2}r)] \cos 2\theta; \\ \sigma_{\theta3} &= \frac{E}{2\gamma_1(1-\nu^2)} [AJ_0(\gamma_1^{1/2}r) + BN_0(\gamma_1^{1/2}r) - CK_0(\gamma_1^{1/2}r)] + \\ &+ \frac{E}{2\gamma_1^{3/2}(1-\nu^2)r} [AJ_1(\gamma_1^{1/2}r) + BN_1(\gamma_1^{1/2}r) + CK_1(\gamma_1^{1/2}r)] + \\ &+ \frac{E}{2(1-\nu^2)\gamma_1} [A_1J_0(r\sqrt{\gamma_1}) + B_1N_0(r\sqrt{\gamma_1}) + C_1K_0(r\sqrt{\gamma_1})] \cos 2\theta - \frac{3E}{2r(1-\nu^2)\gamma_1^{3/2}} [A_1J_1(r\sqrt{\gamma_1}) + \\ &+ B_1N_1(r\sqrt{\gamma_1}) + C_1K_1(r\sqrt{\gamma_1})] \cos 2\theta + \frac{3E}{r^2(1-\nu^2)\gamma_1^2} [A_1J_2(r\sqrt{\gamma_1}) + B_1N_2(r\sqrt{\gamma_1}) + C_1K_2(r\sqrt{\gamma_1})] \cos 2\theta; \\ \tau_{r\theta3} &= \frac{E}{r(1-\nu^2)\gamma_1^{3/2}} [A_1J_1(r\sqrt{\gamma_1}) + B_1N_1(r\sqrt{\gamma_1}) + C_1K_1(r\sqrt{\gamma_1})] \sin 2\theta - \frac{3E}{r^2(1-\nu^2)\gamma_1^2} \times \\ &\times [A_1J_2(r\sqrt{\gamma_1}) + B_1N_2(r\sqrt{\gamma_1}) + C_1K_2(r\sqrt{\gamma_1})] \sin 2\theta; \\ \gamma_1^2 &= \frac{3\beta[3\lambda_2(1-D'_2)^2 + 2\mu_2(1-D'_3)^2](1-\alpha_1)}{2[3\lambda_2(1-D'_2)^2(1-\alpha_1) + 2\mu_2(1-D'_3)^2(3-\alpha_1)]}, \quad \alpha_1 = \frac{3g^2(1-D_0)^2(1-D'_2)^2}{\delta_1}, \\ \delta_1 &= [\lambda_1(1-D_0)^2 + 2\mu_1(1-D_1)^2][3\lambda_2(1-D'_2)^2 + 2\mu_2(1-D'_3)^2]; \end{aligned}$$

$$D'_2 = \frac{\pi\omega_1}{1 + \pi\omega_1}, \quad D'_3 = \frac{\pi\omega_1}{1 + \nu_1 + \pi\omega_1}; \quad \omega_1 = \eta_1 c_1^2.$$

1.2. Стадия стабильного распространения вторичной трещины

Экспериментально установлено, что микротрещины начинают распространяться сквозь породную матрицу при определенном условии напряженного состояния, инициирующем появление вторичных микротрещин [15–18]. Учитывая длину микротрещин и жесткость трещин в породе, можно записать критическое условие для нуклеации вторичных трещин:

$$\sigma''_2 + f(c_1)S''_2 = -\frac{K_{IC}}{\sqrt{2d_i \tan\left(\frac{\pi c_1}{2d_i}\right)}}, \quad (9)$$

где K_{IC} — жесткость трещины в породе, которую можно определить экспериментально;

$$\sigma''_2 = \frac{\sigma'_r + \sigma'_\theta}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma'_r - \sigma'_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}'^2}; \quad \sigma''_1 = \frac{\sigma'_r + \sigma'_\theta}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma'_r - \sigma'_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}'^2}; \quad S''_2 = \sigma''_2 - (\sigma''_1 + \sigma''_2)/2.$$

Коэффициент интенсивности напряжения на вершинах вторичных микротрещин можно выразить следующим образом:

$$K_I = -[\sigma''_2 + f(l)S''_2] \sqrt{2d_i \tan\left(\frac{\pi l}{2d_i}\right)}, \quad (10)$$

где $f(l) = d/l$, l — длина роста вторичных микротрещин.

Критическое условие для стабильного роста вторичных микротрещин

$$K_I = K_{IC}. \quad (11)$$

Когда длина роста вторичных микротрещин l достигает величины c_2 , нагрузочная способность породы достигает максимума и порода начинает разрушаться.

Критическое условие разрушения породы

$$\sigma''_2 + f(c_2)S''_2 = -\frac{K_{IC}}{\sqrt{2d_i \tan\left(\frac{\pi c_2}{2d_i}\right)}}. \quad (12)$$

Заменяя c_0 на c_2 в уравнении (2), можно определить прочность породы на одноосное растяжение $\sigma''_{i\max} = \sigma''_2 + f(c_2)S''_2$, а длину стабильного роста вторичной трещины c_2 найти, адаптируя уравнения (2) и (12).

В этом случае поле напряжения во вмещающем породном массиве вокруг глубинного тоннеля запишется как

$$\sigma''_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r4}, \quad (13)$$

$$\sigma''_\theta = \sigma_{\theta1} + \sigma_{\theta4}, \quad (14)$$

$$\tau''_{r\theta} = \tau_{r\theta1} + \tau_{r\theta4}, \quad (15)$$

$$\text{где } \sigma_{r4} = \frac{E}{2\gamma_2^{3/2}(1-\nu^2)r} [AJ_1(\gamma_2^{1/2}r) + BN_1(\gamma_2^{1/2}r) + CK_1(\gamma_2^{1/2}r)] +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{E}{2(1-\nu^2)r\gamma_2^{3/2}} [A_1 J_1(\gamma_2^{1/2}r) + B_1 N_1(\gamma_2^{1/2}r) + C_1 K_1(\gamma_2^{1/2}r)] \cos 2\theta - \frac{3E}{(1-\nu^2)r^2\gamma_2^2} \times \\
 & \times [A_1 J_2(\gamma_2^{1/2}r) + B_1 N_2(\gamma_2^{1/2}r) + C_1 K_2(\gamma_2^{1/2}r)] \cos 2\theta; \\
 \sigma_{\theta 4} & = \frac{E}{2\gamma_2(1-\nu^2)} [A J_0(\gamma_2^{1/2}r) + B N_0(\gamma_2^{1/2}r) - C K_0(\gamma_2^{1/2}r)] + \\
 & + \frac{E}{2\gamma_2^{3/2}(1-\nu^2)r} [A J_1(\gamma_2^{1/2}r) + B N_1(\gamma_2^{1/2}r) + C K_1(\gamma_2^{1/2}r)] + \frac{E}{2(1-\nu^2)\gamma_2} \times \\
 & \times [A_1 J_0(r\sqrt{\gamma_2}) + B_1 N_0(r\sqrt{\gamma_2}) + C_1 K_0(r\sqrt{\gamma_2})] \cos 2\theta - \frac{3E}{2r(1-\nu^2)\gamma_2^{3/2}} [A_1 J_1(r\sqrt{\gamma_2}) + B_1 N_1(r\sqrt{\gamma_2}) + \\
 & + C_1 K_1(r\sqrt{\gamma_2})] \cos 2\theta + \frac{3E}{r^2(1-\nu^2)\gamma_2^2} [A_1 J_2(r\sqrt{\gamma_2}) + B_1 N_2(r\sqrt{\gamma_2}) + C_1 K_2(r\sqrt{\gamma_2})] \cos 2\theta; \\
 \tau_{r\theta 4} & = \frac{E}{r(1-\nu^2)\gamma_2^{3/2}} [A_1 J_1(r\sqrt{\gamma_2}) + B_1 N_1(r\sqrt{\gamma_2}) + C_1 K_1(r\sqrt{\gamma_2})] \sin 2\theta - \frac{3E}{r^2(1-\nu^2)\gamma_2^2} \times \\
 & \times [A_1 J_2(r\sqrt{\gamma_2}) + B_1 N_2(r\sqrt{\gamma_2}) + C_1 K_2(r\sqrt{\gamma_2})] \sin 2\theta; \\
 \gamma_2^2 & = \frac{3\beta[3\lambda_2(1-D_2'')^2 + 2\mu_2(1-D_3'')^2](1-\alpha_2)}{2[3\lambda_2(1-D_2'')^2(1-\alpha_2) + 2\mu_2(1-D_3'')^2(3-\alpha_2)]}, \quad \beta = \frac{\mu_2(1-D_3'')^2}{\mu_3}, \quad \alpha_2 = \frac{3g^2(1-D_0)^2(1-D_2'')^2}{\delta_2}, \\
 \delta_2 & = [\lambda_1(1-D_0)^2 + 2\mu_1(1-D_1)^2][3\lambda_2(1-D_2'')^2 + 2\mu_2(1-D_3'')^2]; \\
 D_2'' & = \frac{\pi\omega_2}{1+\pi\omega_2}, \quad D_3'' = \frac{\pi\omega_2}{1+\nu_1+\pi\omega_2}; \quad \omega_2 = \eta_2 c_2^2.
 \end{aligned}$$

1.3. Стадия стабильного распространения и слияния вторичных трещин, формирования макротрещин и зональной дезинтеграции

Когда полудлина вторичных микротрещин превышает c_2 , рост вторичных микротрещин становится нестабильным и нагрузочная способность породы снижается с появлением локальных нарушений целостности породы. Критическое условие локального нарушения выражено в уравнении (12). Нестабильный рост вторичных микротрещин приводит к их слиянию и формированию макротрещин, а затем к разрушению породного массива.

Длина роста от момента нуклеации до слияния вторичных микротрещин

$$l = d_i - c_1. \quad (16)$$

Длина роста от момента нестабильного распространения до слияния вторичных микротрещин с образованием макротрещин и зональной дезинтеграцией

$$l = d_i - c_2. \quad (17)$$

Местоположение зон трещиноватости можно определить из вышеприведенных уравнений.

2. ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

2.1. Влияние эволюции нарушения на распределение напряжений вмещающего породного массива вокруг глубинного тоннеля круглого сечения

Эффект развития нарушений сплошности на распределение напряжений во вмещающем породном массиве вокруг глубинного тоннеля круглого сечения был рассмотрен при следующих параметрах материала: $\nu = 0.2$, $C = C_1 = 765 \text{ м}^{-2}$, $g = 90 \text{ МПа}$, $\lambda_1 = 4 \text{ ГПа}$, $\lambda_2 = 4.4444 \text{ ГПа}$, $\theta = 0^\circ$, $\mu_1 = 4 \text{ ГПа}$, $\mu_2 = 6.6667 \text{ ГПа}$, $\mu_3 = 5 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$, $r_0 = 7 \text{ м}$, $\sigma_h = 40 \text{ МПа}$, $\sigma_v = 20 \text{ МПа}$, $\eta_0 = 5000$, $c_0 = 0.8 \text{ мм}$.

Установлено, что в процессе эволюции нарушений за счет распространения микротрещин касательное напряжение на боковой стенке круглого тоннеля увеличилось со 119 до 148 МПа, а касательное напряжение в точке на расстоянии 1 м от боковой стенки уменьшилось с 63 до 43 МПа, в то время как касательное напряжение в точке на расстоянии 4 м увеличилось с 67 до 83 МПа. Это означает, что касательное напряжение на боковой стенке круглого тоннеля и распределение напряжения во вмещающем породном массиве вокруг глубинного тоннеля имеют более четко выраженный волновой характер при учете эволюции нарушений, индуцированных микротрещинами, по сравнению с этими показателями без учета эволюции. На рис. 2 видно, что эволюция нарушений, индуцируемых микротрещинами, оказывает слабое влияние на радиальное напряжение.

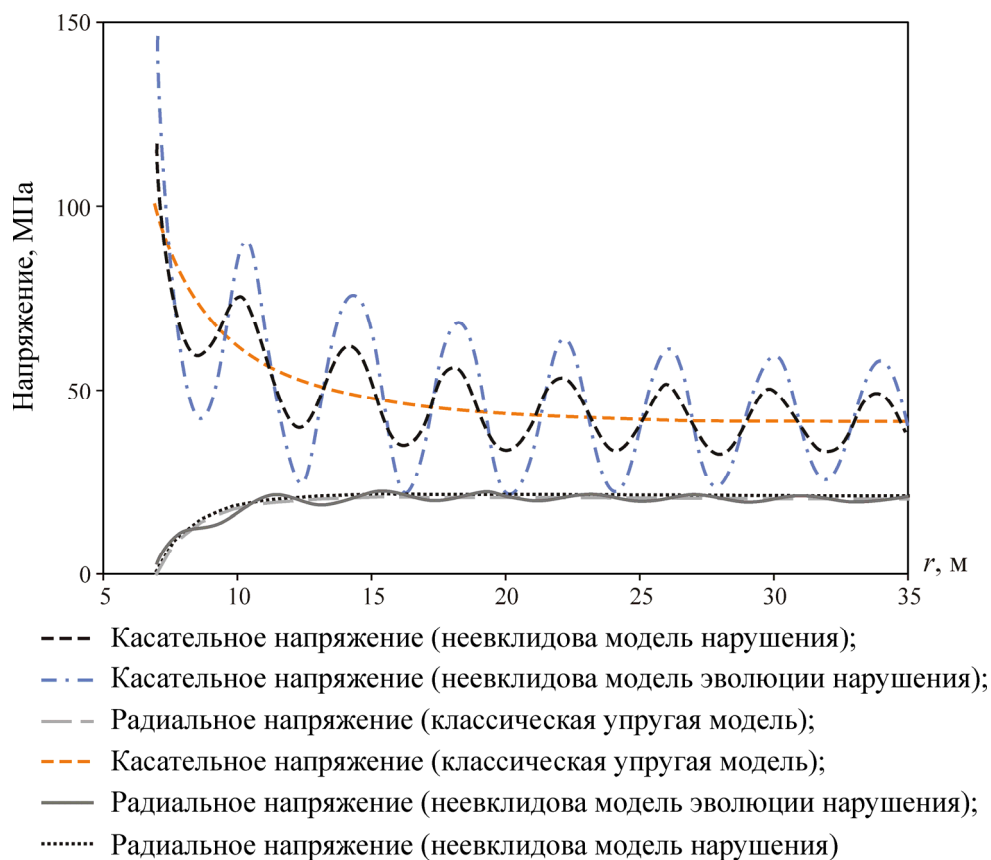


Рис. 2. Влияние эволюции нарушений на распределение напряжений во вмещающем породном массиве вокруг тоннеля

2.2. Влияние степени нарушенности на зоны трещиноватости во вмещающем породном массиве вокруг круглого тоннеля

Выполнен анализ влияния степени нарушенности на зону трещиноватости во вмещающем породном массиве вокруг тоннеля круглого сечения. При моделировании использованы следующие параметры материала: $K_{IC} = 1.9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; $K'_{IC} = 0.3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; $C = 2.25 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$, $g = 90 \text{ МПа}$, $\lambda_1 = 10 \text{ ГПа}$, $\lambda_2 = 8 \text{ ГПа}$, $\mu_1 = 5 \text{ ГПа}$, $\mu_2 = 7 \text{ ГПа}$, $\mu_3 = 558000 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$, $\sigma_h = 50 \text{ МПа}$, $\sigma_v = 50 \text{ МПа}$, $\eta_0 = 50000$, $\eta_1 = \eta_2 = 500$, $c_1 = 0.9 \text{ мм}$, $r_0 = 7 \text{ м}$, $c_0 = 0.85 \text{ мм}$, $d = 3.5 \text{ мм}$, $d_i = 0.9 \text{ мм}$.

На рис. 3 представлена зависимость распределения зон трещиноватости во вмещающем породном массиве от степени нарушенности. Очевидно, что зональная дезинтеграция имеет место при величине нарушенности D_2 выше определенного критического значения, а число зон трещиноватости увеличивается с ростом D_2 .

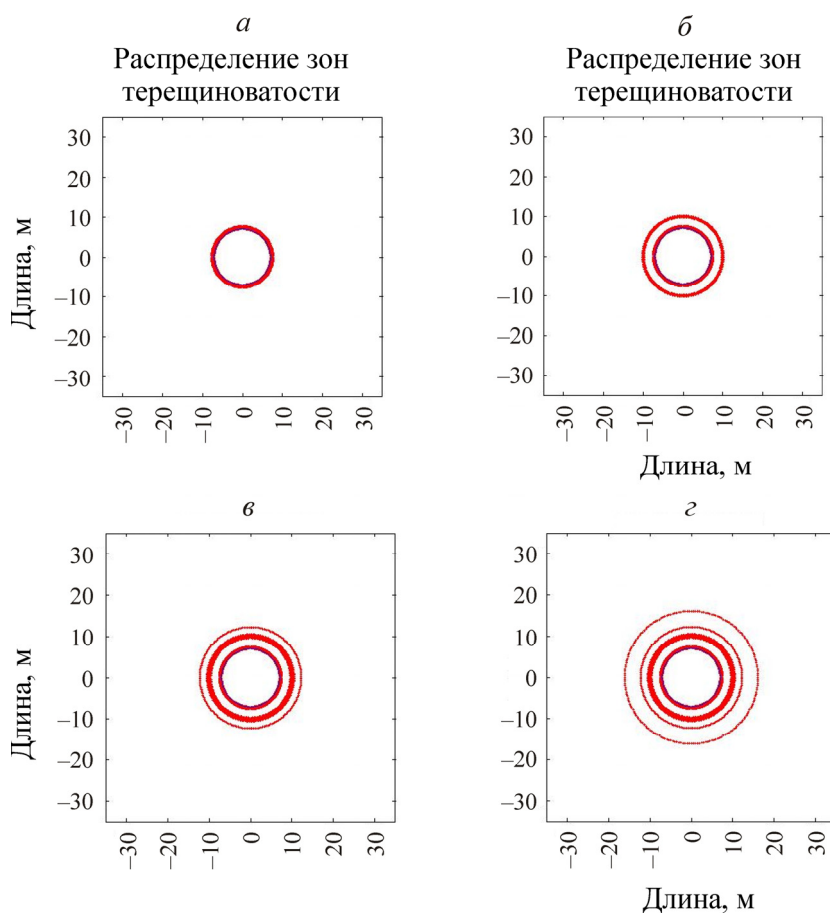


Рис. 3. Зависимость распределения зон трещиноватости от степени нарушенности массива D_2 : а — $D_2 = 0.7$; б — $D_2 = 0.75$; в — $D_2 = 0.81$; г — $D_2 = 0.815$

ВЫВОДЫ

Физический процесс зональной дезинтеграции можно описать следующим образом: при проходке тоннеля в глубокозалегающем породном массиве микротрещины распространяются через породную матрицу и способствуют появлению вторичных трещин. Возникает разрывная и несовместная деформация, которая вызывает формирование самоуравновешенных напряже-

ний. Поле напряжений во вмещающем породном массиве содержит упругие и самоуравновешенные напряжения. Самоуравновешенные напряжения характеризуются как неустойчивые по сравнению с упругими напряжениями и обуславливают нестабильный характер распределения напряжений во вмещающем породном массиве. Концентрация напряжений в вершинах микротрещин вблизи гребня волны достаточно высока и приводит к росту микротрещин и образованию макротрещин и зон трещиноватости. Однако концентрация напряжений в вершинах микротрещин вблизи основания волны относительно мала, она способствует прекращению роста микротрещин и образованию зон, свободных от трещиноватости. Появление гребней, таким образом, способствует образованию зон трещиноватости и сплошности в глубокозалегающих вмещающих породных массивах. Эти породные массивы не подчиняются правилу последовательного формирования зон трещиноватости и сплошности, как в классической теории о континууме. Классическая теория приемлема для мелкозалегающих породных массивов и не подходит для глубокозалегающих.

Новая неевклидова модель разработана для изучения механизма зональной дезинтеграции вмещающих породных массивов вокруг глубинных тоннелей круглого сечения. Учитывается влияние микротрещин на зональную дезинтеграцию в условиях негидростатического давления. Выполнен численный анализ и сделаны следующие выводы:

- распределение напряжений во вмещающем породном массиве вокруг глубинного круглого тоннеля чувствительно к нарушениям в результате эволюции микротрещин;
- явление зональной дезинтеграции имеет место, когда степень нарушенности достигает определенного критического значения, а число зон трещиноватости увеличивается с ростом степени нарушенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cloete D. R., Jager A. J. The nature of the fracture zone in gold mines as revealed by diamond core drilling, Association of Mine Managers, Papers and discussions, 1972–1973.
2. Adams G. R., Jager A. J. Petroscopic observations of rock fracturing ahead of stope faces in deep-level gold mine, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1980, 80(6).
3. Shemyakin E. I., Fisenko G. L., Kurlenya M. V., Oparin V. N., et al. Disintegration zone of rocks around underground workings, Part 1, Data of full-scale observations, Fiz. Tekh. Probl. Razrab. Polezn. Iskop., 1986, No. 3.
4. Shemyakin E. I., Fisenko G. L., Kurlenya M. V., Oparin V. N., et al. Disintegration zone of rocks around underground workings, Part 2, Rock fracture on models from equivalent materials, Fiz. Tekh. Probl. Razrab. Polezn. Iskop., 1986, No. 4.
5. Shemyakin E. I., Fisenko G. L., Kurlenya M. V., Oparin V. N., et al. Disintegration zone of rocks around underground workings, Part 3, Theoretical concepts, Fiz. Tekh. Probl. Razrab. Polezn. Iskop., 1987, No. 1.
6. Shemyakin E. I., Kurlenya M. V., Oparin V. N., Reva V. N., et al. Disintegration zone of rocks around underground workings, Part 4, Practical applications, Fiz. Tekh. Probl. Razrab. Polezn. Iskop., 1989, No. 4.
7. Shemyakin I., Kurlenya M. V., Oparin V. N., Reva V. N., et al. USSR discovery No. 400, Phenomenon of zonal disintegration of rocks around underground workings. Byull. Izobret., 1992, (1).
8. Guzev M. A., Paroshin A. A. Non-euclidean model of the zonal disintegration of rocks around an underground working, Journal of Applied mechanics and Technical Physics, 2001, 42 (1).

9. **Myasnikov V. P., Guzev M. A.** Thermomechanical model of elastic-plastic, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2000, Vol. 33, No. 3.
10. **Guzev M. A.** Structure of kinematic and force fields in the Riemannian continuum model, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, 52(5).
11. **Qian Qihu, Zhou Xiaoping.** Noneuclidean continuum model of the zonal disintegration of surrounding rocks around a deep circular tunnel in a non-hydrostatic pressure state, *Journal of Mining Science*, 2011, 47(1).
12. **Reva V. N.** Stability criteria of underground workings under zonal disintegration of rocks, *Fiz. Tekh. Probl. Razrab. Polezn. Iskop.*, 2002, 38 (1).
13. **Qian Q. H., Zhou X. P.** Effects of the axial in situ stresses on the zonal disintegration phenomenon in the surrounding rock masses around a deep circular tunnel, *Journal of Mining Science*, 2012, 48(1).
14. **Zhou X. P., Chen G., Qian Q. H.** Zonal disintegration mechanism of cross-anisotropic rock masses around a deep circular tunnel, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012, 57(1).
15. **Golshani A., Okui Y., Oda M., et al.** A micromechanical model for brittle failure of rock and its relation to crack growth observed in triaxial compression tests of granite, *Mechanics of Materials*, 2006, 38 (4).
16. **Li Chunrui, Kang Lijun, Qi Qingxin, et al.** Probe into relationship between zonal fracturing and rock burst in deep tunnel, *Journal of China Coal Society*, 2010, 35 (2), 185–190 (in Chinese).
17. **Golshani A., Oda M., Okui Y., et al.** Numerical simulation of the excavation damaged zone around an opening in brittle rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44 (6).
18. **Zhou Xiaoping.** Analysis of the localization of deformation and the complete stress-strain relation for mesoscopic heterogeneous brittle rock under dynamic uniaxial tensile loading, *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(5/6).
19. **Benvensite Y.** On the Mori–Tanaka’s method in cracked solids, *Mechanics Research Communications*, 1986, No 13(4).
20. **Qian Q. H., Zhou X. P.** Effect of damage variable on stress field of the deep surrounding rock masses around a deep circular tunnel in non-Euclidean model, Submitted to *Journal of mining Science*.

Поступила в редакцию 15/1 2013