

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 539.431: 624.19.059.22

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КАУСТИК ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН ВОКРУГ ТОННЕЛЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Кан Лю, Дунмин Го, Цзюнь Чжан, Синьчао Кан

*Китайский университет горного дела и технологий,
E-mail: liukang0512@163.com, Дорога Хуэйюань, 11, 100080, г. Пекин, Китай*

С помощью метода каустик изучен механизм развития естественных изначальных трещин в окружающей породе возле тоннеля под действием взрыва. Процесс развития таких трещин можно разделить на два этапа, которые разграничиваются моментом проникновения радиальной трещины от взрыва в изначальную. На первом этапе изначальная трещина развивается в поле напряжений, определяемом свободной поверхностью тоннеля параллельно ей, в вертикальном направлении. На втором этапе под влиянием радиальной трещины изначальная трещина поворачивается и развивается параллельно радиальной. На противоположной стороне тоннеля, в нижней ее части, возможно появление новой трещины. Моделирование показало, что направление развития такой трещины изменяется после того, как изначальная трещина достигает свободной поверхности тоннеля.

Взрывная нагрузка, окрестность тоннеля, изначальная естественная трещина, механизм развития трещины, метод каустик

DOI: 10.15372/FTPRPI20210505

При прокладке тоннелей широко используются проходческие комбайны. Однако работа в массивах скальных пород приводит к повышенному износу техники и росту энергозатрат [1]. В этом случае буровые и взрывные работы остаются наиболее эффективным способом прокладки тоннелей, относительно простым и менее затратным [2].

Прокладка тоннеля с помощью взрыва может негативно повлиять на безопасность в соседних тоннелях [3]. При взрывной нагрузке динамическая реакция соседних тоннелей оценивается концентрацией напряжений в сейсмической волне и определением динамического коэффициента концентрации напряжений (ДФКН) [4, 5]. Обнаружено, что модули упругости окружающей породы и внутренней бетонной отделки тоннеля значительно влияют на ДФКН. Установлено, что ДФКН на ближней к взрыву стороне больше, чем на дальней стороне [6, 7]. При численном анализе и полевых испытаниях скорость частиц и эффективное напряжение окру-

жающих пород приняты в качестве основных показателей. В работах [8, 9] показано, что максимальные скорости частиц фиксировались в поперечном к опоре свода крепи тоннеля направлении. Разрушение в тоннеле, пройденном через гору Дамаошан, происходило в облицовке или на ее границе со скальными породами при превышении пиковой скорости частиц во взрывной волне 0.30 м/с [10].

В общем случае предполагается, что окружающая порода является нетронутой и анализ ее динамической реакции выполнен с учетом взрывной нагрузки. Установлено, что разрушение окружающей породы из-за взрывной нагрузки проявляется в виде отслоения и обрушения кровли в результате развития трещины [11]. Метод каустик — один из наиболее эффективных методов прогнозирования распространения трещин [12]. С помощью данного метода получены многие значимые результаты. Например, когда трещина от взрыва распространяется по направлению к стволу, коэффициент интенсивности напряжений имеет тенденцию к увеличению [13]. Коэффициент интенсивности динамического напряжения при постоянной скорости трещины больше, когда трещина тормозится, чем когда ускоряется [14].

Метод каустик позволяет четко фиксировать полный процесс развития трещины и получать значения динамических, кинематических и механических параметров в условиях взрывной нагрузки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оборудование для эксперимента по методу каустик включает в себя лазерный излучатель (точечный источник), расширитель луча, две линзы, держатель образца и высокоскоростную камеру (рис. 1).



Рис. 1. Установка для исследования развития трещины методом каустик

Расстояние между расширителем луча и линзой 1 регулируется таким образом, чтобы сформировалось равномерное световое поле от лазерного излучателя (рис. 1). После прохождения света через линзу 1 возникает параллельный световой пучок, который освещает испытуемый образец. Когда образец подвергается взрывной нагрузке, у вершины трещины возникает концентрация напряжений. В результате рефракции свет при прохождении образца преломляется. При помещении плоскости экрана между образцом и линзой 2 наблюдается отчетливая темная область, или фокальное пятно, которая может быть зафиксирована высокоскоростной камерой через линзу 2.

Взрывная нагрузка имеет две составляющие: волновое нагружение от взрыва и квазистатическое от действия, возникающего при взрыве газа. На свободных берегах трещины при воздействии взрывной нагрузки наблюдаются напряжения растяжения и сжатия, а на кромке трещины — концентрация напряжений. В результате вблизи кромки трещины происходит упруго-

пластическое деформирование, которое приводит к изменению коэффициента преломления. Когда пучок параллельного света попадает на трещину, происходит его отклонение из-за световой рефракции. При размещении непрозрачного листа между образцом и линзой 2 наблюдается темная область, именуемая фокальным пятном. Динамическая концентрация напряжений на краю трещины преобразуется в геометрическую тень оптического рисунка, что значительно упрощает задачу анализа. Данный метод называется методом каустик (рис. 2) [15]. Так как край трещины подвергается совместному воздействию волны сдвига, волны сжатия, отраженной волны растяжения и волны разгрузки, трещина развивается по сложной траектории.

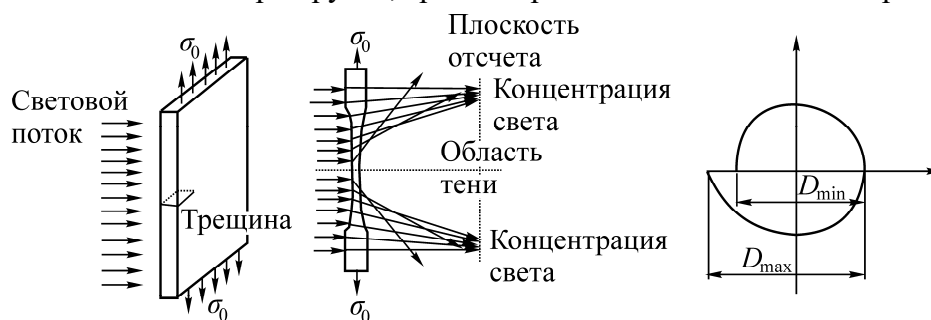


Рис. 2. Схема образования каустик

Высокоскоростная камера записывает серии изображений процесса развития трещины с определенным интервалом. Длина трещины в различные моменты времени может быть определена измерением расстояния от геометрического центра фокального пятна до точки отсчета. С помощью программы “Origin” кривая скорости развития трещины описывается функцией

$$v = \dot{l}(t). \quad (1)$$

Динамические коэффициенты интенсивности напряжений (K_I , K_{II}) тесно коррелируют с полем напряжения и отражают степень концентрации напряжений на краю трещины. Динамические коэффициенты интенсивности напряжений по данным измерения размеров каустики определяются следующим образом [12]:

$$\begin{cases} K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3g^{5/2}z_0Cd} D_{\max}^{5/2}, \\ K_{II} = \mu K_I, \end{cases} \quad (2)$$

где z_0 — расстояние между плоскостью отсчета и образцом; C — оптическая константа плексигласа; d — толщина пластины из плексигласа; μ — коэффициент пропорциональности, который определяется как $(D_{\max} - D_{\min})/D_{\max}$; g — числовая константа, зависящая от величины μ . Диаметры $D_{\max}$ и $D_{\min}$ фокального пятна находятся по полученным изображениям.

Динамическая интенсивность высвобождения энергии значительно влияет на развитие трещины. Наблюдается корреляция между динамической интенсивностью высвобождения энергии G и динамическими коэффициентами интенсивности напряжений [16]. Их соотношение при плоском напряженном состоянии можно представить как

$$G = \frac{1}{E} [A_I(v)K_I^2 + A_{II}(v)K_{II}^2], \quad (3)$$

здесь E — модуль упругости материала; $A_I(v)$, $A_{II}(v)$ — функции скорости развития трещин.

При $\nu=1$ $A_1(\nu)=A_{II}(\nu)=1$.

При $\nu \neq 0$, $A_1(\nu)=\nu^2\alpha_d/((1-\nu)c_s^2D)$, $A_{II}(\nu)=\nu^2\alpha_d/((1-\nu)c_s^2D)$

$$\alpha_d = \sqrt{1 - \frac{\nu^2}{c_d^2}}, \quad \alpha_s = \sqrt{1 - \frac{\nu^2}{c_s^2}}, \quad D = 4\alpha_d\alpha_s - (1 + \alpha_s^2)^2,$$

где c_d — скорость распространения продольной волны; c_s — скорость волны сдвига.

Физические и механические свойства испытуемой породы должны быть близки к свойствам породы, залегающей в окрестностях тоннеля. Однако горную породу трудно обрабатывать, она хрупкая, содержит дефекты в виде трещин, что приводит к увеличению ошибок в результатах испытаний. При использовании непосредственно породы можно получить только траектории развития трещины, но не динамический процесс, его кинематические и динамические параметры. Для более точного моделирования нестационарной взрывной нагрузки на соседний тоннель использован изотропный материал с хорошей пластичностью. Проведение испытаний по методу каустик требует материала с высоким коэффициентом пропускания. Таким качеством обладает полиметилметакрилат (PMMA), который показал свою эффективность в подобных испытаниях. Ниже представлены динамические параметры и оптическая константа используемого материала [17]:

Материал	ρ , кг/м ³	C_d , м/с	C_s , м/с	E_d , ГН/м ²	ν_d	$ C $, м ² /Н
PMMA	1145	2190	1200	3.595	0.32	0.084

Размер образца составляет $300 \times 300 \times 5$ мм³ (рис. 3). В середине пластины расположено полукруглое отверстие арочной формы с прямыми стенками, которое моделирует соседний тоннель. Нижняя часть отверстия имеет прямоугольную форму размером 40×20 мм², а верхняя — полукруг в виде арки с радиусом 20 мм. Длина изначальной трещины составляет 5 мм, расстояние между взрывной скважиной и изначальной трещиной L_1 — 32 мм, а расстояние между изначальной трещиной и пятой свода крепи тоннеля L_2 — 5 мм. Выбор таких размеров гарантирует возникновение необходимого явления в ходе испытания. Взрывная скважина диаметром 6 мм расположена слева от отверстия (тоннеля) и заполнена одним слоем взрывчатого вещества (азид свинца) для моделирования буровзрывных работ в соседнем тоннеле.



Рис. 3. Схема исследуемого образца

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Результаты испытаний при одинаковых условиях могут значительно отличаться друг от друга из-за неконтролируемого воздействия взрывной нагрузки. На рис. 4 представлены два типовых характерных варианта развития изначальной трещины. В первом варианте после взрыва

произошло расширение взрывной камеры и образовалось некоторое количество трещин в радиальных направлениях (рис. 4а). Среди них одна (главная), направленная к соседнему тоннелю, проникла в изначальную трещину в ее правом крае. В левом крае изначальная трещина раздвоилась на вертикальную и трещину, отклоненную в сторону к главной. Правый край изначальной трещины сначала развивался вертикально, а потом повернул и распространился горизонтально до свободной поверхности тоннеля. При этом в нижней части дальней стороны тоннеля образовалась трещина. Вторым вариантом развития изначальной трещины заключается в проникновении главной трещины в левый край (рис. 4б). В этом случае левый край не раздвоился, трещина подросла на 2 мм в вертикальном направлении, затем повернула и в направлении, параллельном главной трещине, проросла до свободной поверхности тоннеля. Образованная в нижней части дальней стороны тоннеля трещина имела большую длину по сравнению с первым случаем. В начале она росла под углом примерно -15° к горизонтали, далее повернула и окончательно развивалась под углом примерно 27° .

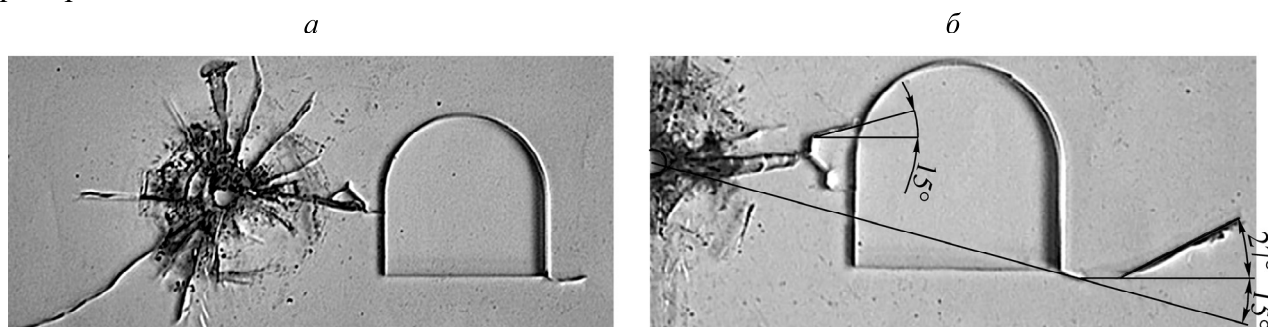


Рис. 4. Типовые варианты развития трещин при взрывной нагрузке

С помощью метода каустик были получены изображения процесса развития изначальной трещины (рис. 5). Под воздействием взрывной нагрузки оба края изначальной трещины сначала растут в вертикальном направлении. После проникновения главной трещины от взрыва в изначальную направление развития изначальной трещины изменяется. Процесс ее развития можно разделить на два этапа. Первый этап происходит до проникновения главной трещины в изначальную, а второй — после.

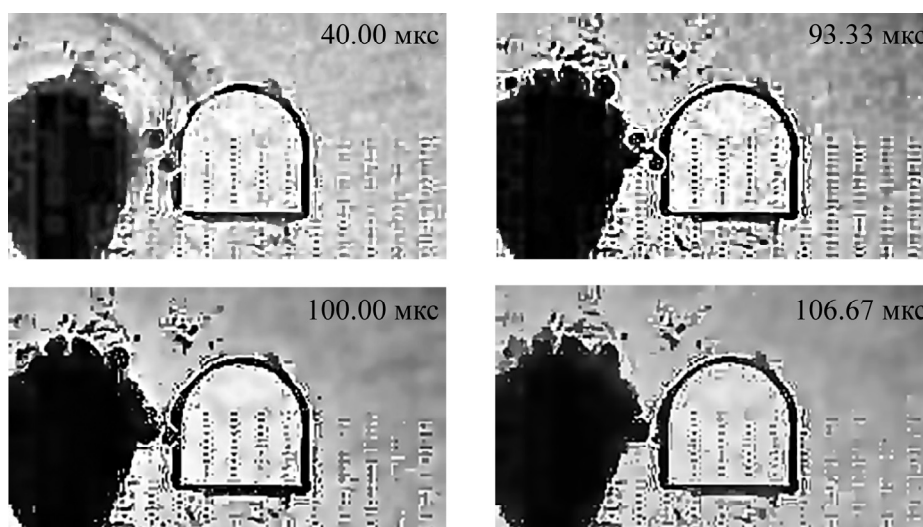


Рис. 5. Серия изображений каустик в момент проникновения главной трещины в изначальную

Сложно определить основную причину, влияющую на развитие трещины на первом этапе. Анализируя результаты, можно предположить, что возможным фактором, влияющим на направление развития изначальной трещины на этом этапе, является свободная поверхность тоннеля. Для проверки данной гипотезы проведено новое испытание (рис. 6). Без соседнего тоннеля развитие трещины в вертикальном направлении отсутствовало. Этот факт подтверждает, что свободная поверхность тоннеля — ключевой фактор развития изначальной трещины на первом этапе.

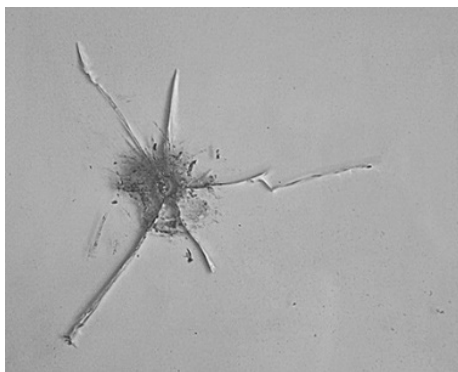


Рис. 6. Развитие трещины при взрывной нагрузке без тоннеля

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ИЗНАЧАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ

Оба края изначальной трещины растут в вертикальном направлении на первом этапе из-за влияния свободной поверхности тоннеля. После детонации взрывчатого вещества волна сжатия сначала воздействует на изначальную трещину. Ее развитие связано с двумя типами напряжений: напряжением сдвига, возникающего вследствие пересечения волной сжатия края трещины, и напряжением растяжения, возникающего из-за отраженной волны от края трещины [18]. Под действием этих напряжений изначальная трещина может развиваться в радиальном направлении от взрывной скважины. Однако в эксперименте изначальная трещина не развивается в результате падения волны сжатия. Когда волна сжатия достигает свободной поверхности тоннеля, она отражается и образует волну растяжения, которая заставляет развиваться оба края изначальной трещины. В [19, 20] сделаны похожие выводы, что подтверждает полученные результаты и объясняет явление отслоения обделки, которое наблюдается на свободной поверхности тоннеля при близких взрывах.

Второй этап развития изначальной трещины начинается, когда основная трещина от взрывной скважины проходит через край изначальной, при этом направление ее роста становится параллельным главной трещине. Для понимания развития изначальной трещины на втором этапе проанализирована движущая сила и направление ее развития.

Для более простого анализа процесса развития изначальной трещины в качестве примера рассмотрим случай без тоннеля. Развитие изначальной трещины без учета тоннеля также происходит параллельно главной после того, как она проникнет в изначальную трещину.

Динамическая интенсивность высвобождения энергии G отражает требуемую энергию для развития трещины. Величина G связана с динамическим коэффициентом интенсивности напряжения и со скоростью развития трещины. Таким образом, тренд G похож на тренд скорости развития трещины (рис. 7а). После проникновения главной трещины в изначальную она начинает развиваться. В этот момент значение G изначальной трещины повышается. Процесс проникновения сопровождается передачей и суперпозицией упругой энергии.

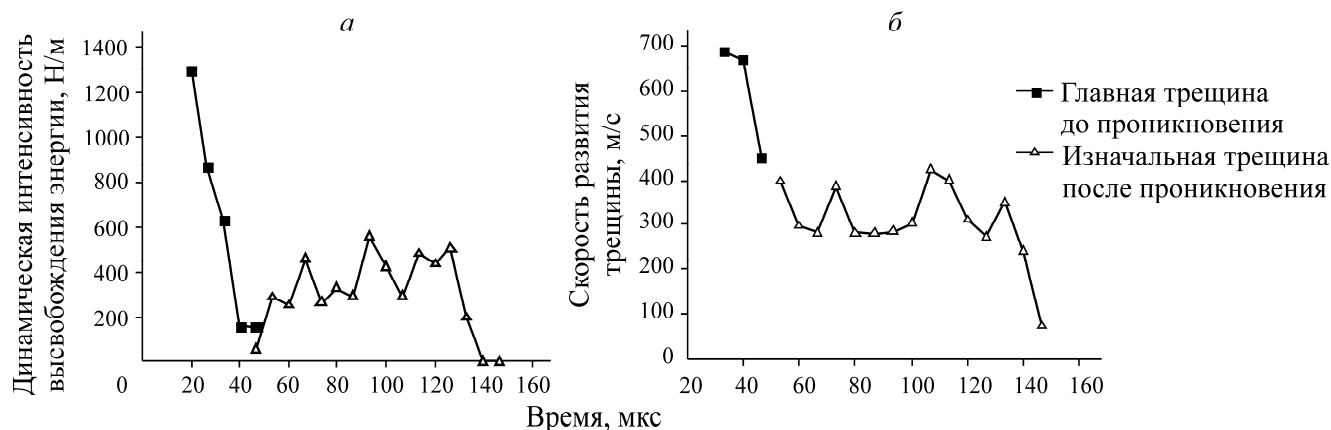


Рис. 7. Зависимости динамической интенсивности высвобождения энергии (а) и скорости развития (б) главной и изначальной трещин от времени

После 40 – 50 мкс основная трещина проникает в изначальную (рис. 7б). Скорость развития изначальной трещины меньше, чем у главной; с момента проникновения она колеблется около 300 м/с. После детонации радиальные трещины, в том числе главная, развиваются под действием ударной волны, которая затем постепенно затухает до упругой волны напряжения, и скорость развития главной трещины постепенно уменьшается. Передача и суперпозиция энергии при проникновении способствуют инициации развития изначальной трещины. Также следует отметить, что источником энергии развития изначальной трещины является волна напряжения от взрыва.

Скорость развития и интенсивность высвобождения энергии G главной трещины быстро уменьшаются при постепенном затухании взрывной волны (рис. 7). После проникновения изначальная трещина начинает развиваться под воздействием волны напряжения, ее скорость развития и интенсивность высвобождения энергии G колеблются относительно определенного значения.

В общем случае изначальная трещина начинает развиваться от ее вершины, расположенной ближе к источнику взрыва, по направлению к нему и соединяется с главной трещиной. От вершины, расположенной дальше от источника взрыва, трещина развивается по направлению от него (рис. 4а). В некоторых случаях от ближней к взрыву вершины трещина развивается от источника взрыва (рис. 4б). Причина этого явления — проникновение главной трещины в край изначальной, который расположен ближе к источнику взрыва. Направление развития главной трещины определяет развитие изначальной, которая на втором этапе развивается параллельно главной.

Под воздействием волны напряжения на краю изначальной трещины создается большое количество микротрещин с определенным распределением. Микротрещины развиваются в радиальном направлении от взрывной скважины. Под влиянием доминирующего фактора изначальная трещина прорастает в область микроповреждений по заданному направлению (рис. 8). В рамках проведенных испытаний доминирующим фактором развития изначальной трещины является главная трещина.



Рис. 8. Развитие изначальной трещины и ее проникновение в область микротрещин

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ИНДУЦИРОВАННОЙ ТРЕЩИНЫ НА ДАЛЬНОЙ СТОРОНЕ ТОННЕЛЯ

Ближняя к источнику взрыва сторона тоннеля рассматривается как наиболее уязвимая область [21]. Но в ходе проводимых испытаний обнаружено, что в нижнем углу дальней стороны возникают трещины, развитие которых также влияет на безопасность в тоннеле.

Процесс развития трещины на дальней стороне можно разделить на два этапа (рис. 4б). На первом этапе трещина развивается радиально от взрывной скважины под влиянием волны напряжения. На втором этапе, когда изначальная трещина достигает свободной поверхности тоннеля на ближней стороне, трещина на дальней стороне начинает отклоняться вверх. Если рассматривать тоннель как огромную трещину, то направление развития трещины на дальней стороне должно совпадать с направлением развития изначальной трещины на ближней стороне. Анализ характера развития изначальной трещины показал, что угол развития трещины на дальней стороне на втором этапе превышает угол развития изначальной трещины. Следовательно, на данную трещину также влияют другие процессы. Во время дифракции распространяемой волны в среде запасается большое количество энергии деформации, высвобождение которой значительно влияет на направление развития трещин. Образующаяся при дифракции разгрузка приводит к возникновению растягивающих напряжений. Таким образом, направление развития трещины изменяется при совместном воздействии раскрытия изначальной трещины и разгрузки в дифрагированной волне от взрыва.

Зависимость скорости развития трещины от времени имеет сходный характер с динамическим коэффициентом интенсивности напряжения (рис. 9). Сначала эти параметры колеблются относительно определенного значения, затем начинают уменьшаться. Следует отметить, что средняя скорость развития трещины на дальней стороне меньше, чем скорость изначальной трещины.

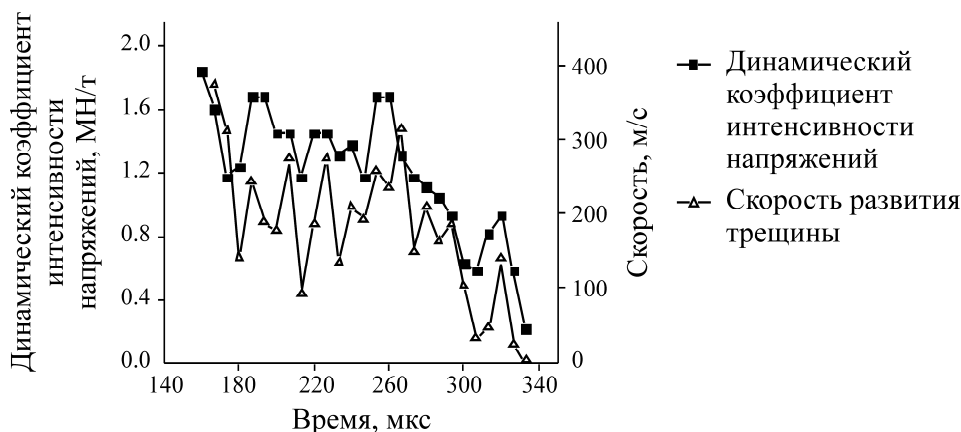


Рис. 9. Зависимость скорости развития и динамического коэффициента интенсивности напряжений от времени для трещины на дальней стороне тоннеля

ВЫВОДЫ

Проведено исследование развития естественной изначальной трещины в окружающей породе в окрестностях тоннеля в условиях взрывной нагрузки. Методом каустик отслежен процесс развития трещины, а также определены его динамические, кинематические и механические параметры.

Процесс развития изначальной трещины разделен на два этапа. Отраженная от свободной поверхности тоннеля взрывная волна значительно влияет на развитие изначальной трещины на первом этапе, трещина развивается вертикально под действием растяжения в горизонталь-

ном направлении. Когда главная радиальная трещина от источника взрыва проникает в изначальную трещину, она становится основным доминирующим фактором ее развития на втором этапе, в котором изначальная трещина поворачивается и развивается параллельно главной.

На дальней стороне тоннеля также возникает трещина, процесс развития которой можно также разделить на два этапа. На первом этапе образование трещины происходит из-за волны напряжения от взрыва и трещина растет в радиальном направлении от взрывной скважины. На втором этапе, после того как изначальная трещина дойдет до свободной поверхности тоннеля, на развитие трещины влияют раскрытие изначальной трещины и разгрузка среды, возникающая в результате дифракции волны от взрыва на тоннеле. Средняя скорость развития трещины на дальней стороне меньше, чем скорость образования изначальной трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hu M., Zhou H., Zhang Y., Zhang C., Gao Y., Hu D., and Lu J.** Acoustic emission monitoring on damage evolution of surrounding rock during headrace tunnel excavation by TBM, *Eur. J. Environ. Civil Eng.*, 2019, No. 23. — P. 1248–1264.
2. **Baum N., Boxheimer S., Krause D., Renz F., Hoffmann B., Wächter J., and Klingenberg T.** Drill & blast and special foundation in Gothenburg, *Bautechnik*, 2019, No. 96. — P. 549–556.
3. **Tao M., Hong Z., Peng K., Sun P., Cao M., and Du K.** Evaluation of excavation-damaged zone around underground tunnels by theoretical calculation and field test methods, *Energies*, 2019, No. 12. — P. 1–18.
4. **Li X. B., Li C. J., Cao W. Z., and Tao M.** Dynamic stress concentration and energy evolution of deep-buried tunnels under blasting loads, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2018, Vol. 104. — P. 131–146.
5. **Zhang S., Li Y., Shen B., Sun X., and Gao L.** Effective evaluation of pressure relief drilling for reducing rock bursts and its application in underground coal mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2019, Vol. 114. — P. 7–16.
6. **Li X.-H., Long Y., Ji C., Zhou X., and Lu L.** Dynamic stress concentration factor for tunnel surrounding rock under blasting seismic waves, *Chin. J. Geotech. Eng.*, 2013, Vol. 35, No. 3. — P. 378–382.
7. **Li Y., Zhang S., and Zhang X.** Classification and fractal characteristics of coal rock fragments under uniaxial cyclic loading conditions, *Arabian J. Geosci.*, 2018, Vol. 11, No. 9. — P. 201.
8. **Shin J.-H., Moon H.-Q., and Chae S.-E.** Effect of blast-induced vibration on existing tunnels in soft rocks, *Tunneling Underground Space Tech.*, 2011, Vol. 26, No. 1. — P. 51–61.
9. **Xia X., Li H.B., Li J.C., Liu B., and Yu C.** A Case study on rock damage prediction and control method for underground tunnels subjected to adjacent excavation blasting, *Tunneling Underground Spacing Tech.*, 2013, No. 35. — P. 1–7.
10. **Zhang S., Li Y., Shen B., Sun X., and Gao L.** Effective evaluation of pressure relief drilling for reducing rock bursts and its application in underground coal mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2019, Vol. 114. — P. 7–16.
11. **Zhu Z., Mohanty B., and Xie H.** Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007, Vol. 44, No. 3. — P. 412–424.
12. **Papadopoulos G. A.** Dynamic caustics and its applications, *Opt. Lasers Eng.*, 1990, Vol. 13, No. 3. — P. 211–249.
13. **Guo D., Liu K., Lu H., Yang R., Wang C., and Wang Y.** Fracture behavior of an empty hole using the digital laser dynamic caustic method under directional controlled blasting, *Mater. Testing*, 2016, No. 58. — P. 982–991.
14. **Arakawa K., Mada T., and Takahashi K.** Correlations among dynamic stress intensity factor, crack velocity and acceleration in brittle fracture, *Int. J. Fracture*, 2000, Vol. 105, No. 4. — P. 311–320.

15. **Yang R. S., Wang Y. B., and Guo D. M.** Experimental research of crack propagation in polymethyl methacrylate material containing flaws under explosive stress waves, *J. Test. Eval.*, 2016, Vol. 44, No. 1. — P. 248–257.
16. **Freund L. B.** Dynamic fracture mechanics, New York, Cambridge University Press, 1990. — 563 p.
17. **Guo D., Zhou B., Liu K., Yang R., and Yan P.** Dynamic caustics test of blast load impact on neighboring different cross-section roadways, *Int. J. Min. Sci. Tech.*, 2016, Vol. 26. — P. 803–808.
18. **Hu R., Zhu Z.-M., Hu Z.-Y., et al.** Experimental study of regularity of crack propagation under blasting dynamic loads, *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 2013, Vol. 32, No. 7. — P. 1477–1481.
19. **Nemat-Nasser S. and Horii H.** Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst, *J. Geophys. Res.*, 1982, Vol. 87, No. B8. — P. 6805–6821.
20. **Ma G. W. and An X. M.** Numerical simulation of blasting-induced rock fractures, *Int. J. Rock Min. Sci.*, 2008, Vol. 45. — P. 966–975.
21. **Li J. C., Li H. B., Ma G. W., and Zhou Y. X.** Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion, *Tunnelling and Underground Space Tech.*, 2013, Vol. 35. — P. 227–234.

Поступила в редакцию 04/III 2021

После доработки 15/VI 2021

Принята к публикации 10/IX 2021