

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СТРАГИВАНИЯ ТРЕЩИН, ИНИЦИИРОВАННОГО КОЛЕБАНИЯМИ В ПОРОДНОЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЙ СРЕДЕ**Ю. Н. Головко, Е. А. Сдвижкова, И. В. Кондратюк**Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»
просп. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49027, Україна. E-mail: sviks@i.ua

Рассмотрен породный массив, в котором трещины испытывают влияние квазистационарных напряжений и упругих колебаний, генерируемых внешним источником. На основе пространственно-временного подхода к описанию разрушения твердых тел определено условие страгивания трещины. Даны количественные соотношения между критической длиной трещины, квазистатическим напряжением, амплитудой и частотой колебаний. Показано, что существуют частоты колебаний, на которых критическая длина трещин особо чувствительна к изменению амплитуды. Так, например, для песчаника увеличение амплитуды колебаний в два раза на частоте 1145 Гц приводит к уменьшению длины страгиваемых трещин в три раза. Численные результаты коррелируют с экспериментальными данными акустического прогноза динамических явлений в породном массиве.

Ключевые слова: трещины, напряжение, амплитуда, разрушение, колебания.**ВИЗНАЧЕННЯ УМОВИ СТАРТУ ТРІЩИН, ІНІЦІЙОВАНОГО КОЛИВАННЯМИ В ПОРОДНОМУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ****Ю. Н. Головко, О. О. Сдвижкова, І. В. Кондратюк**Державний вищий навчальний заклад «Национальный горный университет»
просп. К.Маркса, 19, м. Днепропетровськ, 49027, Україна. E-mail: sviks@i.ua

Розглянуто породний масив, в якому тріщини знаходяться під впливом квазістаціонарних напружень та пружних коливань, що генеруються зовнішнім джерелом. На основі просторово-часового підходу до опису руйнування твердих тіл визначено умову старту тріщини. Надані кількісні співвідношення між критичною довжиною тріщини, квазістатичним напруженням, амплітудою і частотою коливань. Показано, що існують частоти коливань, на яких критична довжина тріщин особливо чутлива до зміни амплітуди. Так, наприклад, для пісковику збільшення амплітуди коливань в два рази на частоті 1145 Гц призводить до зменшення довжини тріщин, що стартують, у три рази. Чисельні результати корелюють з експериментальними даними акустичного прогнозу динамічних явищ у породному масиві.

Ключові слова: тріщини, напруга, амплітуда, руйнування, коливання.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Породный массив, включающий угольные пласты, представляет собой существенно неоднородную среду, в которой под воздействием горных работ происходят сложные процессы, приводящие при определённых сочетаниях влияющих факторов к негативным динамическим явлениям и проявляющиеся, в частности, как катастрофически быстрое разрушение породной среды. В большинстве случаев такой характер разрушения связан с развитием трещин.

Прогноз динамических явлений, особенно при подземных горных работах, занимает важнейшее место в системе мер, обеспечивающих безопасность производства. Ряд методик прогноза основан на регистрации и анализе колебаний, регистрируемых в породных массивах [1]. Используемые при этом критерии опасности не достаточно обоснованы. Учитывая, что прогноз упрощённо можно толковать как прогноз разрушения, представляется целесообразным изучить влияние, оказываемое колебательными процессами на трещины в предварительно напряжённо-деформированной среде. Источники колебаний при этом могут быть разными и зачастую точно не идентифицируемыми.

Акустические импульсы в твёрдом теле генерируются нарушениями его целостности, такими как дислокации и трещины. Вопросам генерации упру-

гих импульсов при развитии трещин посвящено большое число научных работ [2]. Предполагается, что центрами акустической активности горных пород являются сами трещины. Источником энергии для развития трещины, разрывающей внутренние связи в структуре твёрдого тела, является энергия напряжённо-деформированной среды в окрестности трещины. Трещина, будучи концентратором напряжений, при превышении напряжения определенной величины растёт, реализуя излишек упругой энергии в угольном пласте. При этом резкое изменение напряжений, которые окружают трещину, порождает импульс, действующий, в свою очередь, на другие трещины. При нагрузках, которые приводят к хрупкому разрушению материала, упругие волны могут останавливать или ускорять процесс роста трещины, а также способствовать появлению новых трещин [3].

Источниками колебаний также являются различные механизмы, в том числе и породоразрушающие, действующие на породный массив. В последнем случае генерируемые колебания «обогащаются» колебаниями, обусловленными процессами разрушения в зоне рабочих органов.

В любом случае трещины, изначально присутствующие в породной среде, находятся под воздействием как медленно изменяющегося напряжённо-

деформированного состояния, так и под воздействием существенно более быстро изменяющихся напряжений (колебаний), генерируемых некоторым внешним для каждой индивидуальной трещины источником. При этом размеры некоторых трещин могут увеличиваться. Определение условий, необходимых для такого увеличения размеров трещины (страгивания трещины) является важным теоретическим шагом для повышения надежности методов прогноза динамических явлений на основе анализа акустических сигналов, регистрируемых в породном массиве.

Цель работы – определение условий страгивания трещин, инициированного колебаниями в породной, напряженно-деформированной среде.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Будем рассматривать одиночную трещину в безграничном пространстве, находящуюся в нестационарном поле напряжений. Требуется определить условия нагружения, при которых размеры данной трещины могут увеличиться.

Принимаем следующие допущения: среда упругая; трещина дисковая; разрушение хрупкое нормального отрыва; напряжение, нормальное плоскости трещины, представляет собой сумму квазистатической и гармонической составляющей; эффекты усталости не учитываются.

Как известно, трещина является нарушением сплошности среды, вызывающим концентрацию напряжений в области, примыкающей к ее вершине. Величина напряжения в вершине трещины может превысить предел прочности материала (в рамках модели хрупкого разрушения – превысить предельное значение коэффициента интенсивности напряжения), в результате чего происходит рост трещины, создание условий для образования новых трещин и, как следствие, разрушение определенного объема материала. Существуют различные подходы к установлению критериев, определяющих условия разрушения при действии напряжений, изменяющихся во времени и пространстве.

В работе [4] предложен наиболее общий критерий, основанный на пространственно-временном подходе к описанию разрушения:

$$\frac{1}{\tau d} \int_{x_0-d}^{x_0} \int_{t_0-\tau}^{t_0} \sigma_1(x, t) dt dx \geq \sigma_{1c}, \quad (1)$$

где $\sigma_1(x, t)$ – главное напряжение; σ_{1c} – прочность на разрыв; τ – временной параметр, характеризующий задержку отклика разрушаемого материала на рассматриваемом структурном уровне; d – параметр длины; x – координата вдоль оси, перпендикулярной главному напряжению; t – время; x_0, t_0 – координата точки и момент времени разрушения.

Применяя условие (1) вблизи вершины трещины, где силовое поле однозначно определяется величи-

ной коэффициента интенсивности напряжения $K_1(t) \cdot \sigma(x, t) = \frac{K_1(t)}{\sqrt{2\pi x}}$ и выбирая достаточно формально параметр $d = \frac{2K_{1c}}{\pi\sigma_{1c}^2}$, где K_{1c} – критическое

значение K_1 (коэффициент трещиностойкости) авторы [3] получили условие разрушения в виде:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} K(t) dt \geq K_{1c}, \quad (2)$$

Условие страгивания трещины при гармоническом нагружении. Коэффициент интенсивности напряжений выразим через регулярное главное напряжение σ_1 для дисковой трещины с характерным размером (радиусом) l . Тогда из (2) получим условие старта трещины при данном уровне напряжений:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} \sigma_1(t) dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{K_{1c}}{\sqrt{l}}, \quad (3)$$

В общем случае в разрабатываемом породном массиве действуют не только квазистатические напряжения, изменения которых в пространстве и времени вызываются проведением подземных работ и осуществлением очистных работ, но и быстро изменяющиеся знакопеременные напряжения в упругих волнах, возникающих при ударных воздействиях на массив и генерируемых внутри массива при его хрупком разрушении. При этом в конкретной точке массива при одновременном действии квазистатических напряжений и упругой волны тензор напряжений $T_{\sigma(t)}$, действующий в окрестности трещины, представляет собой сумму тензоров квазистатических напряжений $T_{\text{квст}}$ и напряжений в волне $T_{E(t)} : T_{\sigma(t)} = T_{Kc(t)} + T_{E(t)}$. Напряжение, нормальное плоскости трещины, в окрестности момента страгивания трещины представим в виде:

$$\sigma_1(t) = \sigma_0 + k(t-t_0) + a \cos[2\pi v(t-t_0) + \varphi_0], \quad (4)$$

Здесь $\sigma_0 + k(t-t_0)$ – составляющая напряжений, не связанная с колебаниями, σ_0 – растягивающее напряжение, $k = \left(\frac{dy}{dx} \right)_{t=t_0}$ – компонента, связанная с

изменением напряжений во времени при развитии горных работ, a, v, φ_0 – амплитуда, частота и фаза в момент страгивания трещины.

Подставляя (4) в (3), после преобразований получим условие, выполняемое в момент страгивания трещины с учетом воздействия упругих колебаний:

$$\alpha \sin(\pi v \tau) - \frac{\tau k}{2} + \sigma_0 \geq \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{l}} K_{1c}, \quad (5)$$

Достоїнством (5), як следствие (1), (2), являється применимость как при високих, так и при низких (включая $\nu=0$) частотах колебаний.

Инкубационное время τ не является однозначно определённым параметром и его значение может по-разному выбираться и интерпретироваться [4]. В любом случае τ следует рассматривать (как указывалось выше) как параметр, характеризующий задержку отклика разрушаемого материала на рассматриваемом структурном уровне при нестационарном нагружении. Когда критериальное соотношение выражено через полное напряжение, параметр τ определяется как время передачи энергии между соседними элементарными структурами разрушения с характерным размером d . Если же используется только регулярная составляющая напряжения, как в (3), то оценить время отклика можно на основе решения задачи о падении ступенчатой волны расширения на трещину конечной длины. Численное решение такой задачи и его анализ [5] показал, что коэффициент интенсивности напряжения в вершине трещины монотонно растёт, достигая максимума в момент прихода волны Рэлея из противоположной вершины, и далее колеблется возле его стационарного значения. На этом основании примем: $\tau=l/c_R$, где c_R – скорость волны Рэлея.

Тогда, вводя следующие безразмерные величины

$$\bar{l} = \frac{i\nu}{c_R}; \bar{a} = \frac{a}{\sigma_0}; \alpha = \frac{k}{\sigma_0\nu}; K_{cv} = \frac{K_{Ic}}{2\sigma_0} \sqrt{\frac{\pi\nu}{c_R}},$$

преобразуем (5) к виду

$$\bar{a} \sin(\pi\bar{l}) > \frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha\bar{l}}{2} - 1, \quad (6)$$

Равенство (6) определяет условие страгивания трещины.

Если $K_c, c_R, \sigma_0, k, \nu$ – постоянные величины, то параметры K_{cv} и α также остаются неизменными. Тогда переменными в критериальном условии (6) являются только \bar{l} и \bar{a} , т.е. страгивание трещины с характерной длиной \bar{l} определяется только амплитудой колебаний \bar{a} . Связь между указанными величинами может быть получена как решение трансцендентного уравнения (6).

При этом следует учесть, что если рассматривается страгивание, вызванное колебаниями, то обе части (6) должны быть больше нуля. Если правая часть меньше нуля, то уже только квазистационарное напряжение обеспечивают страгивание трещины, а если $K_{cv} < \sqrt{\bar{l}}$, то разрушение обеспечивает постоянная составляющая напряжения.

Численный анализ критериальных соотношений. Выше указывалось, что полагая константами тре-

щиностойкость среды K_c , скорость распространения волн Рэлея c_R , параметры напряженного состояния σ_0, k , получим уравнение (6) как связь между относительной амплитудой колебаний упругой волны \bar{a} и относительной длиной трещины \bar{l} , которая страгивается при данном уровне амплитуды (рис. 1).

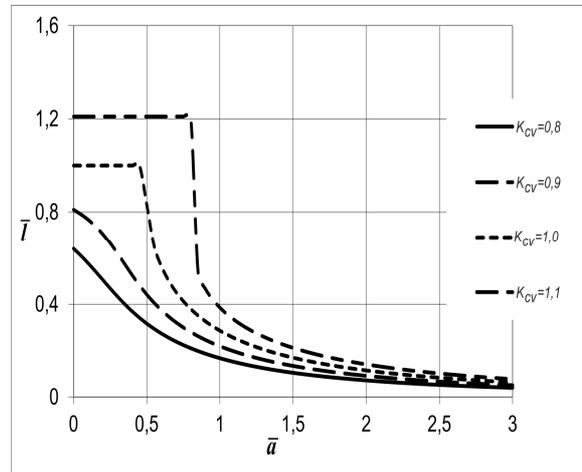


Рисунок – 1 Зависимость критической длины трещины от относительной амплитуды наведенных колебаний ($\alpha=0$)

Наибольший интерес представляют кривые с резким падением критической длины трещины \bar{l} , ($K_{cv}=1,0$ и $K_{cv}=1,1$), наблюдаемым после участков, параллельных оси абсцисс. Заметим, что горизонтальные участки кривых соответствуют ситуации, когда выполняется условие $\frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha\bar{l}}{2} - 1 \leq 0$, т.е.

когда страгивание трещины обусловлено только квазистационарной составляющей нагрузки (не связанной с наведенными колебаниями). При меньших значениях комплекса K_{cv} уменьшение критической длины трещины с ростом амплитуды колебаний происходит значительно медленнее. При больших значениях K_{cv} горизонтальные участки увеличиваются, и резкое падение длины перемещается в область практически не реализуемых значений $\bar{a} > 1$. Поэтому значение $K_{cv} \approx 1$ предлагается рассматривать как критическое. При таком K_{cv} изменение безразмерной амплитуды колебаний в два раза (с 0,4 до 0,8) приводит к уменьшению критической длины трещины почти в три раза.

Например, для мелкозернистого песчаника по данным [6, 7] длина волн Рэлея составляет $c_R=2400$ м/с и коэффициент трещиностойкости имеет величину $K_{Ic}=1,47$ МПа $\sqrt{м}$. Положив $K_{cv}=1$, $\sigma_0=0,9$ МПа, получаем, что указанный эффект должен проявляться в виде резкого (с 4 до 1,6 м) уменьшения критической длины трещины и, следовательно, значительного повышения опасности катастрофического разрушения при частоте колебаний 1145 Гц.

Сравнение с экспериментальными данными. В [8] приведены результаты экспериментальных исследований потенциально опасных областей породного массива путем зондирования искусственным акустическим сигналом, генерированным в угольный пласт добычными или проходческими механизмами. С использованием разработанной акустической аппаратуры АК-1 выполнялась регистрация акустического сигнала, обработка и анализ составляющих амплитудно-частотного спектра в диапазонах 0–300 Гц и 1250–4000 Гц.

Обработка статистической информации позволила установить взаимосвязь между амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) распространяющихся в массиве упругих колебаний и уровнем потенциальной опасности динамического явления. Отмечено, что реальная выбросоопасная зона угольного пласта характеризуется большой изменчивостью АЧХ, в том числе миграцией основной частоты в спектре и появлением высокоамплитудных высокочастотных гармоник. Последнее обстоятельство отмечено во всех регистрируемых случаях выброса угля и газа. Поэтому повышение в 2–3 раза амплитуды регистрируемых колебаний в массиве горных выработок на частотах 1000–1300 Гц рассматривается как эмпирически установленный и стандартизованный [1] признак возможного динамического проявления горного давления.

Результаты приведенных выше теоретических результатов совпадают с эмпирическими данными: двукратное увеличение амплитуды наведенных в массиве колебаний на уровне частоты 1145 Гц приводит к страгиванию «коротких» трещин, длина которых составляет менее двух метров, что может рассматриваться как возможность резкого высвобождения потенциальной энергии в породном пласте и развития динамического явления.

ВЫВОДЫ. 1. На основе общего пространственно-временного подхода к описанию разрушения твердых тел определено условие страгивания трещины при нестационарном нагружении, представляющем собой сумму квазистационарной и гармонической составляющих.

2. Определены количественные соотношения между квазистатическим напряжением, амплитудой и частотой колебаний, а также длиной трещины, при которой возможно ее «страгивание».

3. В качестве примера для песчаника показано, что увеличение амплитуды упругих колебаний в два раза в области высоких частот (1145 Гц) уменьшает критическую длину стартовых трещин в 2–3 раза.

4. Численные результаты коррелируют с экспериментальными данными, показывающими, что повышение в 2–3 раза амплитуды регистрируемых колебаний в породном массиве на частотах примерно такой же величины (1000–1300 Гц) является признаком возможных динамических явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: СОУ 10.1.00174088.011:2005 / О.М. Брюханов, О.В. Агафонов, А.В. Анциферов і ін. – К.:Мінвуглепром України, 2005. – 224 с.

2. Захаров В.Н., Фейт Г.Н., Малинникова О.Н., Аверин А.П. Энергия колебаний горных пород в зонах ведения горных работ при отработке угольных месторождений подземным способом // XX сессия Российского акустического общества «Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Геологическая акустика». – М.: ГЕОС, 2008. – Т. 1. – С. 309–312.

3. Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров А.Ю. Распространение трещины при разрушении полиметилметакрилата // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, вып. 2. – С. 62–69.

4. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1997. – 132 с.

5. Партон В.З., Борисовский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

6. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В. Предельное состояние горных пород. – К.: Наукова думка, 1982. – 200 с.

7. Особенности поведения крепких скальных пород при импульсном воздействии взрыва зарядов промышленных взрывчатых веществ / В.М. Комир, Я.С. Долударева, Т.Ф. Козловская и др. // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 6/2011 (71), част. 1. – С. 128–131.

8. Масленников Е.В. Оценка возможностей способов прогноза динамических явлений на угольных пластах, опасных по внезапным выбросам угля и газа // Науковий вісник НГА України. – 1999. – № 5. – С. 60–61.

DETERMINING THE CONDITIONS OF CRACK INITIATION UNDER INFLUENCE OF VIBRATIONS IN STRESS STRAIN ROCK MASS

Yu. Golovko, O. Sdvyzhkova, I. Kondratyuk

State Higher Education Institution "National Mining University"

prosp. K. Marks, 19, Dnipropetrovsk, 49027, Ukraine. E-mail: sviks@i.ua

Rock mass containing the cracks influenced by quasi-stationary stress and elastic vibrations generated by an external source is considered. A criterion of crack initiation is developed based on space-time approach to solids fracture description. Numerical relation between the critical crack length, a quasi-static stress, the amplitude and frequency of elas-

tic vibrations is determined. The critical crack length is particularly sensitive to vibration amplitude at certain frequencies. The range of such frequencies has been determined. For example, in case of sandstone increasing the amplitude of elastic vibrations in two times at frequency 1145 Hz reduces the critical length of initiated crack in 2–3 times. Numerical results are correlated with the experimental data regarding the acoustic prediction of dynamic phenomena in the rock mass.

Key words: cracks, stress, amplitude, description, elastic vibrations.

REFERENCES

1. (2005), "Rules of mining in seams exposed to the gas-dynamic phenomena", SOU 10.1.00174088.011:2005 / O.M. Bryukhanov, O.V. Agafonov, A.V. Anciferov *et al.*, Ukraine coal industry standard, Kyiv.
2. Zakharov, V., Faith, G., Malinnikova, O., Averin, A. (2008), "Rocks fluctuation energy in areas of coal underground mining. XX Session of Russian Acoustical Society", *Physical Acoustics. Nonlinear acoustics. Wave propagation and diffraction. Geological acoustics.*, iss. 1/2008, pp. 309–312.
3. Atroshenko, S., Krivosheyev, S., Petrov, A. (2002), "Crack propagation at the destruction of polymethylmethacrylate", *Journal of Technical Physics*, iss. 72/2002 (2), pp. 62–69.
4. Morozov, N., Petrov, V. (1997), "*Problemi dinamiki razrusheniya tverdykh tel*" [Dynamics fracture problems of solids], Publishing of St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia.
5. Parton, V., Borisov, V. (1988), "*Dinamika khrupkogo razrusheniya*" [Dynamics of brittle fracture], Mechanical Engineering, Moscow, Russia.
6. Alexeev, A., Nedodaev, N. (1982), "*Predel'noe sostoyanie gornyh porod*" [Limit state of rocks], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
7. Komir, V., Doludareva, Ya., Kozlovskaya, T. et al. (2011), The hard rock behavior at the pulse effecting the explosion charges of industrial explosives, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 6, no. 71, pp. 128–131.
8. Maslennikov, E. (1999), "Estimating the possibility of dynamic phenomena forecast method in coal seams prone to sudden outbursts of coal and gas", *Scientific journal NMA Ukraine*, iss. 5, pp. 60–61.

Стаття надійшла 19.06.2014.