

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕЩИН ПРИ ВЗРЫВЕ ЗАГЛУБЛЕННОГО ШПУРОВОГО ЗАРЯДА

Евгений Николаевич Шер

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, e-mail: ensher@gmail.com

При взрыве заглубленных скважинных и шпуровых зарядов в хрупком породном массиве основное разрушение горной породы происходит за счет развития радиальных трещин, обусловленных значительными растягивающими азимутальными напряжениями вблизи заряда вдоль его поверхности. В тоже время в окрестности торцов заглубленных зарядов при взрыве вдоль их оси возникают значительные растягивающие напряжения. Наличие таких напряжений может привести к возникновению и развитию осесимметричных трещин. В настоящей работе разработана расчетная схема развития осесимметричных трещин в окрестности торца заряда вблизи свободной поверхности. Проведены примеры расчета формы и размеров таких трещин.

Ключевые слова: горные породы, разрушение, взрыв, шпуровой заряд, осесимметричная трещина, воронка выброса.

MODELLING THE DEVELOPMENT OF AXIALLY SYMMETRIC CRACKS IN THE EXPLOSION OF A BLAST-HOLE CHARGE

Evgeny N. Sher

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)205-30-30, e-mail: ensher@gmail.com

During explosion of buried blast-hole charges at brittle rock solid, main destruction of rock occurs by means of development of radial cracks specified by significant tensile tangential stresses near charge and along its surface. While explosion happens, near end faces of buried charges along its axis significant tensile stresses occur. Presence of such stresses can cause occurring and development of axially symmetric cracks. In the work calculating scheme of axially symmetric cracks development near end face of charge near free surface is developed. Examples of calculations of the shape and size of such cracks are carried out.

Key words: rock, destruction, explosion, blast-hole charge, axially symmetric crack, explosion funnel.

Введение

При взрыве заглубленных скважинных и шпуровых зарядов в хрупком породном массиве после детонации заряда, согласно зонной модели взрыва [1–3], вглубь породы от скважины распространяется упругая волна сжатия и за ней фронт волны дробления. По мере ее распространения, напряжения в упругой волне уменьшаются, и фронт волны дробления затормаживается. При сниже-

нии скорости ее развития до максимальной скорости распространения трещин и при появлении растягивающих азимутальных напряжений возможно образование и развитие радиальных трещин [4, 5]. При этом фронт волны дробления останавливается и фиксируется радиальное смещение упругой среды на границе с раздробленной породой. Достигнутое на первом этапе взрыва расширение упругой среды в последующем сохраняется из-за сопротивления радиальному сжатию раздробленной породы, деформирующейся по закону сухого трения. Такое расширение определяет развитие в упругой зоне породного массива системы радиальных трещин, обусловленных значительными растягивающими азимутальными напряжениями.

В тоже время в окрестности торцов заглубленных удлиненных зарядов при взрыве возникают растягивающие напряжения вдоль оси зарядов. Наличие таких напряжений может привести к возникновению и развитию осесимметричных трещин. В настоящей работе разработана расчетная схема развития осесимметричных трещин в окрестности торца заряда вблизи свободной поверхности. Приведены примеры расчетов формы и размеров таких трещин.

Методы и материалы

Проведем оценку поля напряжений в породном массиве, возникающем при радиальном расширении границы упругой зоны с зоной дробления, образовавшейся при взрыве удлиненного заряда. Принимаем, что такое расширение происходит равномерно вдоль длины заряда и приводит к погонному увеличению объема, ограниченного границей зоны дробления $\Delta V_b = 2\pi b u_b$, где b, u_b – радиус зоны дробления и радиальное перемещение границы упругой зоны и зоны дробления после взрыва. Приближенно поле напряжений вокруг зоны дробления удлиненного заряда можно рассчитать, рассмотрев воздействие на упругое пространство равномерно распределенных вдоль оси заряда центров расширения.

Поле напряжений вокруг центра расширения, расположенного в начале координат описывается выражениями [6]:

$$\sigma_{xx} = C\mu \left(\frac{1}{r^3} - \frac{3x^2}{r^5} \right), \sigma_{xz} = C\mu \left(-\frac{3xz}{r^5} \right), \sigma_{zz} = C\mu \left(\frac{1}{r^3} - \frac{3z^2}{r^5} \right), r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Здесь $4\pi C$ – приращение объема центра расширения; μ – модуль сдвига среды.

Если заряд расположен вдоль оси z в интервале $[-5, 5]$, то поле напряжений σ_{zz} при воздействии всего заряда определяется в точке $(x, 0, z)$ интегралом:

$$\sigma_{zz} = C_1\mu \int_{-5}^5 \left[\frac{1}{(x^2 + (s-z)^2)^{3/2}} - \frac{3(s-z)^2}{(x^2 + (s-z)^2)^{5/2}} \right] ds,$$

где $C_1 = \Delta V_b / 4\pi$.

В расчетах будем пользоваться следующими единицами измерения: за единицу расстояния примем радиус зоны дробления b , за единицу напряжения - модуль сдвига μ . Примем также, что $C=1$. В этом предположении на рис. 1 приведен график $\sigma_{zz}(1,0,z)$, представляющий распределение напряжения σ_{zz} вдоль границы зоны дробления заряда с упругой зоной.

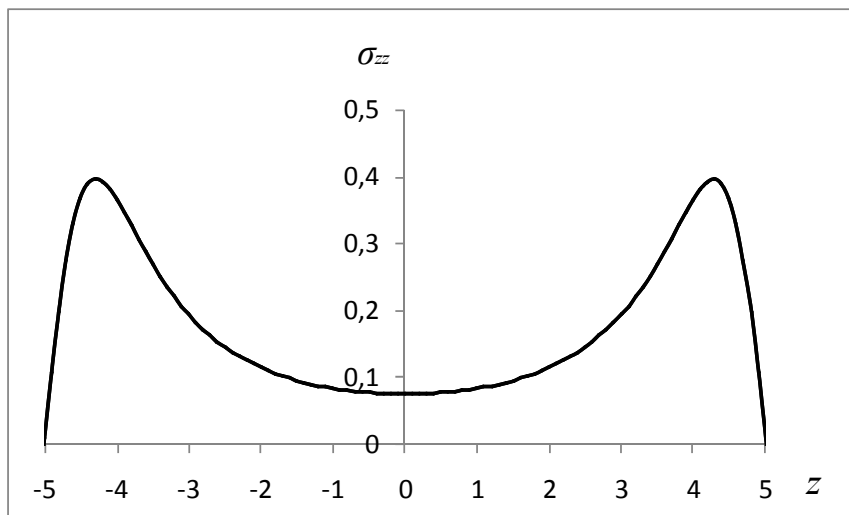


Рис. 1. Распределение напряжения растяжения σ_{zz} на границе упругой зоны вдоль оси заряда.

Видно, что вблизи торцов заряда имеются узкие зоны с повышенными растягивающими вдоль оси z напряжениями. Такие напряжения могут привести к разрушению породы и образованию осесимметричных трещин.

Развитие таких трещин было рассмотрено с учетом влияния свободной поверхности на характер разрушения заглубленного шпурового заряда. Моделирование развития осесимметричных трещин проводилось с использованием программ, разработанных ранее для расчетов развития осесимметричных трещин, возникающих при взрыве сосредоточенного заряда около свободной поверхности и при гидроразрыве [7, 8].

Постановка задачи. Предполагалось, что вертикальный шпуровой заряд длиной H располагался с заглублением h относительно свободной поверхности, как это представлено на рис. 2. Предполагалось также, что в результате взрыва заряда в момент окончания развития зоны дробления происходило нагружение внешней упругой зоны породного массива, характеризуемого следующими параметрами: радиус зоны дробления b , напряжение радиального сжатия на границе зоны дробления и упругой зоны q .

Свободная поверхность моделировалась расположенной при $z=0$ дисковой трещины большого радиуса R , берега которой свободны от напряжений. Форма границы зоны дробления и упругого пространства рассматривалась в виде цилиндра радиуса b и длины H .

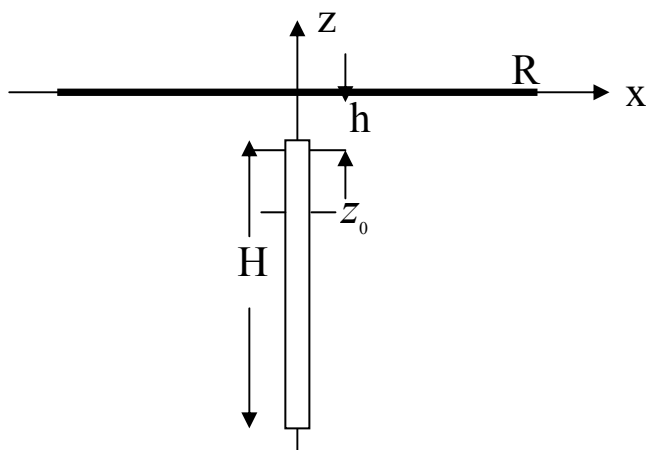


Рис. 2. Схема расположения заряда относительно свободной поверхности

Предполагалось, что упругое пространство на границе с зоной дробления было нагружено равномерно по поверхности цилиндра давлением μ . Поставленная задача приводилась к безразмерному виду. За единицу длины принимался радиус зоны дробления, за единицу напряжения – величина модуля сдвига μ .

Результат расчета распределения напряжений на границе упругой зоны и зоны дробления шпурового заряда длиной 10, заглубленного на 1, приведен на рис. 3. Кривая 1 на этом рисунке соответствует распределению осевого растяжения $\sigma_{zz}(1,0,z)$, кривая 2 – азимутального растяжения $\sigma_{yy}(1,0,z)$.

Из приведенных графиков видно, что вдоль заряда имеется преимущественное азимутальное растяжение, приводящее к развитию радиальных трещин, но в тоже время вблизи торца заряда, ближайшего к свободной поверхности осевое растяжение даже больше азимутального. Отсюда следует, что здесь возможно развитие осесимметричных трещин наряду с развитием радиальных.

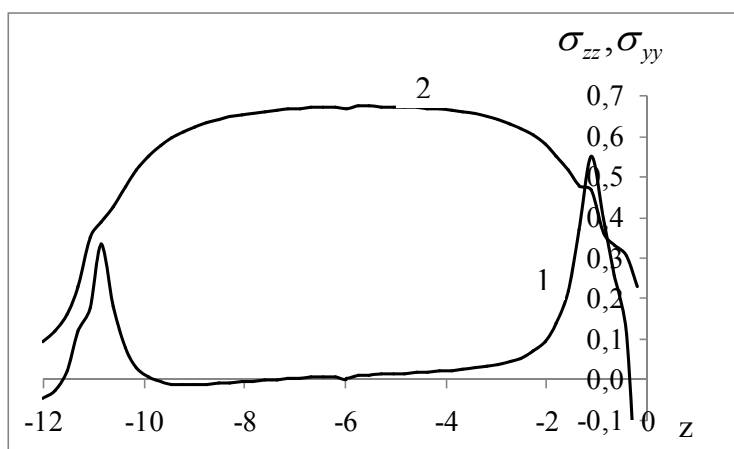


Рис. 3. Распределения осевого $\sigma_{zz}(z)$ и азимутального $\sigma_{yy}(z)$ напряжений на границе упругой зоны вдоль оси заряда (кривые 1, 2)

Как первый этап рассмотрения задачи о разрушении хрупкого породного массива вблизи торца шпурового заряда была рассмотрена задача о развитии осесимметричной трещины в зоне концентрации растягивающего осевого напряжения. Для этого в схеме расположения заряда относительно свободной поверхности в этой зоне располагалась горизонтальная начальная кольцевая трещина (рис. 2) малой ширины на глубине z_0 . Развитие этой начальной осесимметричной трещины производилось по шагам. На каждом шаге определялось поле напряжений в окрестности вершины трещины, находилось направление ее дальнейшего развития в сторону максимального растяжения, определялась величина высвобождающейся энергии. В результате повторения циклов расчета определялась траектория развития трещины до момента приближения или выхода ее на свободную поверхность и изменение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) по мере роста трещины.

Результаты

На рис. 4 для случая шпурового заряда длиной 10 и заглублением 1 приведены в безразмерном виде результаты расчетов траекторий развития осесимметричных трещин при различном заглублении z_0 начальных трещин. На рис. 4, а представлены формы трещин, на рис. 4б графики изменения КИН с ростом радиальной координаты вершины трещины x . Из приведенных рисунков видно, что под действием растягивающего напряжения около верхнего торца заряда начальная трещина развивается на первом этапе вдоль главной оси поля напряжений, при этом ее КИН резко возрастает, что свидетельствует об ускоряющемся ее развитии. На втором этапе фронт трещины направляется к свободной поверхности под углом $\approx 30^\circ$, при этом рост КИН затормаживается.

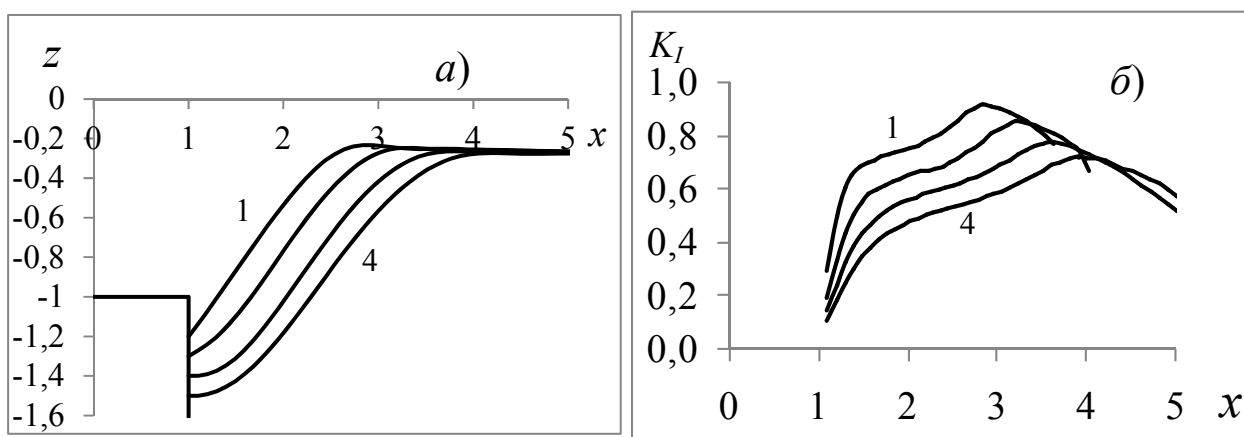


Рис. 4. Расчетные параметры осесимметричных трещин:

а) траектории их развития; б) КИН в зависимости от радиальной координаты вершины трещины x . Кривые 1–4 соответствуют начальному заглублению $z_0 = 1.2, 1.3, 1.4, 1.5$

На третьем этапе трещина распространяется параллельно свободной поверхности, а КИН ее начинает уменьшаться и трещина затормаживается. То, что КИН трещины с ее удлинением монотонно растет, означает, что если трещина струнулась с места, то в дальнейшем ее скорость развития только увеличивается и она выходит к свободной поверхности. За условие начального развития трещины можно принять превышение осевого растяжения σ_{zz} прочности на растяжение σ_t разрушаемой породы.

Обсуждение

Рассмотрим возможность развития осесимметричных трещин вблизи верхнего торца заглубленного шпурового заряда в хрупкой породе типа гранита. По справочным данным для гранита имеем: модуль Юнга $E \approx 5 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, прочность на сжатие $\sigma_c \approx 2 \cdot 10^8$ Па, прочность на растяжение $\sigma_t \approx 1 \div 2 \cdot 10^7$ Па. Воспользуемся квазистатическим подходом [4] к оценке размеров зоны дробления и напряжения сжатия на ее границе с упругой зоной при взрыве шпурового заряда заполненного тротилом в граните. Расчеты по методике, приведенной в [9] дают для взрыва шпурового заряда диаметром 45мм в граните расширение радиуса полости взрыва до 30мм, образования зоны дробления с радиусом $b = 0.5$ м. При этом расширившаяся зона дробления оказывает на упругое пространство давление $q = 3.35 \cdot 10^7$ Па. Рассчитаем исходя из этих данных напряжение осевого растяжения трещин 1-4 рис. 4, а при начале их развития на границе зоны дробления и упругой зоны. Значения таких напряжений для трещин 1-4 рис.4а, пересчитанные с учетом величины q составляют 16.7, 13.7, 11.4, 8.7 МПа, при этом координаты расположения их начальных трещин в размерном виде равны -0.6, -0.65, -0.7, -0.75 м. Заглубление заряда равно 0.5м, длина 5м.

Сравнение значений растягивающих напряжений на начальных трещинах 1-4 с прочностью гранита на растяжение $\sigma_c \approx 1 \div 2 \cdot 10^7$ Па показывает, что действительно осесимметричные трещины 1-3 могли возникнуть и начать развитие при взрыве в граните шпурового заряда длиной 5м и заглублением 0.5 м. Согласно проведенным расчетам при таком взрыве возможно образование воронки диаметром 5 м и глубиной 0.5 м.

В результате проведенных расчетов получено, что при взрыве заглубленного шпурового заряда в хрупкой горной породе около верхнего торца заряда возможно развитие осесимметричных трещин, выходящих при своем развитии на свободную поверхность. Характерным для этих трещин является величина отношения радиуса образующейся при этом воронки к ее глубине: $R_v / h \approx 2.5 \div 3$. Как показывают эксперименты, такие пологие воронки наблюдаются на практике. Результаты многочисленных экспериментов по определе-

нию радиуса воронок, образующихся при взрыве заглубленного заряда, приведены в работах [10, 11]. Эксперименты проводились в шахтах Североуральского бокситового рудника. По методике исследований перпендикулярно обнаженной поверхности бурились шпуры разной длины, в которых размещались заряды с недозарядом разной величины. После взрыва определялся радиус воронки на свободной поверхности R_V . Оказалось, что он ограничивается величиной радиуса зоны радиальных трещин R_c шпурового заряда. При этом в случае $H \geq 5b R_V / h \approx \sqrt{(R_c / h)^2 - 1}$, если $h/b = 1$, как было принято в наших расчетах, то $R_V / h = \sqrt{(R_c / b)^2 - 1}$. Согласно данным [11] отношение радиусов зоны трещин и зоны дробления $R_c / b \approx 3.5 \div 5$. Отсюда в этом случае $R_V / h \approx 2.8 \div 4.9$, что уже достаточно близко к нашим расчетам.

Заключение

В работе исследована возможность образования осесимметричных трещин при взрыве заглубленного шпурового заряда в хрупких горных породах.

1. Проведены расчеты поля напряжений на границе упругой зоны изоны дробления в момент ее остановки в процессе взрыва шпурового заряда. Обнаружено существование значительных растягивающих напряжений вдоль оси упругой зоны

2. Проведено моделирование развития осесимметричных трещин около верхнего торца заглубленного шпурового заряда вблизи свободной поверхности. Определены форма и размеры таких трещин. Проведено сравнение рассчитанных параметров с имеющимися экспериментальными данными. Получено удовлетворительное согласие разработанной теории и эксперимента.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090002-5

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорян, С.С. Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород. // ПММ. – 1967. – Т. 31, вып. 4.
2. Родионов, В.Н., Адушкин, В.В., Ромашев, А.Н. и др. Механический эффект подземного взрыва. – М: Недра, 1971. – 221 с.
3. Чедвик, П., Кокс, А., Гопкинсон, Г. Механика глубинных подземных взрывов. – М.: Мир, 1966. – 126 с.
4. Шер Е. Н. Учет динамики при описании разрушения хрупких сред взрывом шпурового заряда. // ПМТФ. – 1997. – № 3. – С. 484–493.
5. Шер Е.Н., Черников А.Г. Расчет параметров радиальной системы трещин, образующейся при взрыве удлиненного заряда в хрупких горных породах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – № 2. – С. 299–303.

6. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М. : Наука, Главная редакция физико-технической литературы. 1988. – 744 с.
7. Шер Е.Н., Михайлов А.М. Моделирование роста осесимметричных трещин при взрыве и гидроразрыве вблизи свободной поверхности // ФТПРПИ. – 2008. – № 5.
8. Михайлов А.М. Расчет напряжений вокруг трещины // ФТПРПИ. – 2000. – № 5.
9. Александрова Н.И., Шер Е.Н. Учет дилатансии при описании разрушения горных пород взрывом цилиндрического заряда // ФТПРПИ. – 1999. – № 4. – С. 400–408.
10. Кутузов Б. Н., Андриевский А. П. Новая теория и новые технологии разрушения горных пород удлиненными зарядами взрывчатых веществ. – Новосибирск: Наука, 2002. – 96 с.
11. Андриевский А.П., Кутузов Б.Н., Матвеев П.Ф. К вопросу обоснования воронки взрыва (зоны трещинообразования) в скальном массиве при его взрывном нагружении колонковыми зарядами // ФТПРПИ. – 1996. – № 5. – С. 58–64.

© Е. Н. Шер, 2019