

ПРЕЛОМЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН СЛОИСТЫМ ПАКЕТОМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ И ХРУПКИХ СРЕД

Рассмотрено моделирование процесса преломления плоской продольной упругой волны пакетом слоисто-однородных сред. Предполагается, что фронт волны параллелен границам раздела сред. Решение задачи получено с помощью численного конечно-разностного метода.

The given paper considers model study of the process of plane compressional-wave refraction by a system of fissile-homogeneous environment. The wavefront is supposed to be parallel to the environment intersurfaces. The solution of the problem has been obtained by means of the numeric finite-difference method.

Модель объекта исследования, постановка задачи и метод ее решения. Слоистое строение массивов горных пород, наличие в них трещин и протяженных щелей, заполненных флюидами, является основным фактором, влияющим на характер затухания параметров волн напряжений и размеры зон разрушения. Для выявления влияния свободных поверхностей, мощности слоев, ширины слоев и физико-механических свойств материалов, заполняющих их, на параметры плоских волн напряжений при их распространении по слоистой трещиноватой горной породе рассмотрим динамическую задачу определения напряженно-деформированного состояния (НДС) слоистого массива при воздействии на него плоской упругой продольной волны. Для определения НДС слоистого массива необходимо найти компоненты динамического тензора напряжений $\sigma_{xx}^{(1)}$, $\sigma_{yy}^{(1)}$, $\sigma_{xy}^{(1)}$, которые удовлетворяют условиям динамического равновесия [1, 2], дополняются краевыми условиями на контактной границе каждого слоя и условиями на бесконечности. При отсутствии жесткого сцепления слоев кинематические краевые условия на контактных границах равны нормальным скоростям U_x^* , а динамические краевые

условия – нормальным напряжениям $\sigma_{xx}^{(1)}$ при отсутствии касательных напряжений ($\sigma_{xt}^{(1)} = 0$).

Компоненты тензора отраженных и преломленных волн на бесконечности удовлетворяют нулевым условиям. Начальные условия для них и параметров движения среды в невозмущенной области принимаются нулевыми, а в возмущенной области считаются заданными. При моделировании внешних воздействий будем придерживаться классификации горных ударов, данной в работе [3]. Дополнительно примем гипотезу, в соответствии с которой горные удары можно рассматривать как слабые землетрясения, а их параметры считать зависящими от энергетического класса явления (горного удара) $\lg E$ (E измеряется в джоулях).

Для сред с пластическими свойствами используется теория течения Мизеса без упрочнения, и до момента достижения предела упругости хрупкая среда подчиняется закону Гука. В пластическом состоянии второй инвариант тензора напряжений постоянен и равен пределу текучести. Полные приращения составляющих деформации представляют собой суммы упругих и пластических компонент. Приращения упругих компонент тензора напряжений связаны с прираще-

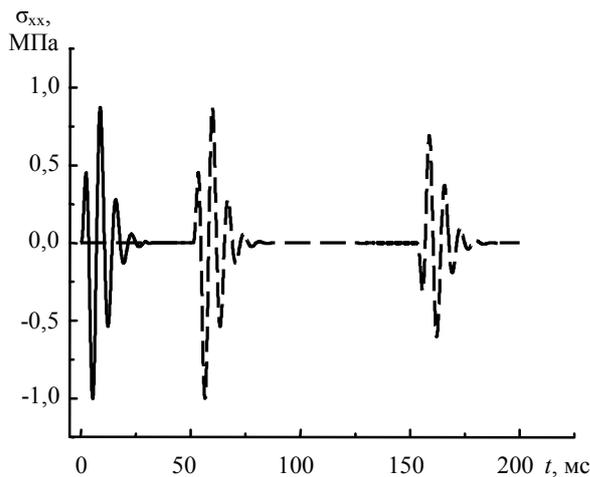


Рис.1. Эпюры прямой и отраженной волн

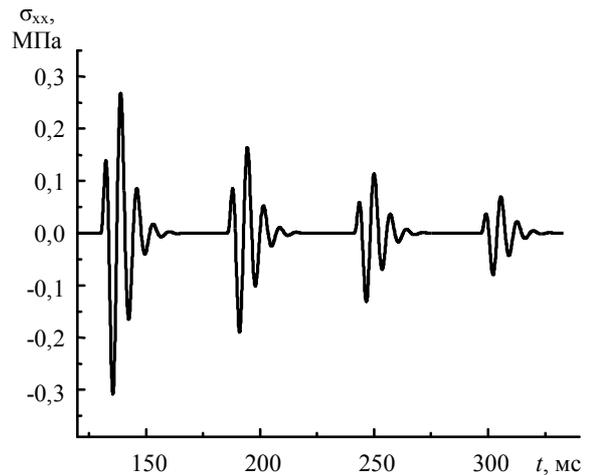


Рис.2. Эпюры преломленной и отраженной волн от границ слоя

ниями упругих компонент тензора деформаций законом Гука. Девидаторы тензора напряжений и тензора приращений пластических деформаций пропорциональны. Модель хрупкой среды строится на основе критерия разрушения Кулона – Мора, и до момента достижения предела прочности хрупкая среда подчиняется закону Гука. В необратимом состоянии разрушения нормальные напряжения в материале могут быть только сжимающими (растягивающие обращаются в ноль), а касательные напряжения линейно зависят от сжимающих напряжений. Угловой коэффициент в этой зависимости равен коэффициенту внутреннего трения, а свободный член – коэффициенту сцепления материала.

Алгоритм численного решения упругой динамической задачи, динамической задачи с пластическим течением и хрупким разрушением сплошной среды строится с помощью варианта явного конечно-разностного метода «крест», приспособленного для решения нелинейных задач.

Результаты расчета и их анализ. Рассматривалось распространение продольной волны, порожденной горным ударом энергетического класса $\lg E = 4$, по слоисто-однородной сплошной среде, состоящей из трех слоев мощностью 600, 100 и 400 м. Плотности, коэффициенты Пуассона и скорости распространения в них продольных волн принимались следующими:

$\rho_1 = 2700 \text{ кг/м}^3$; $\nu_1 = 0,35$; $c_1 = 5870 \text{ м/с}$;
 $\rho_2 = 1600 \text{ кг/м}^3$; $\nu_2 = 0,30$; $c_2 = 1800 \text{ м/с}$;
 $\rho_3 = 2667 \text{ кг/м}^3$; $\nu_3 = 0,26$; $c_3 = 4500 \text{ м/с}$.
 Первый и третий слои при расчетах принимались упругими, а средний мог обладать свойствами как упругой среды, так и упруго-пластической или хрупкой. Для того чтобы лучше показать влияние пластических и хрупких свойств среды на трансформацию эпюр преломленных волн, критические значения напряжений сжатия и растяжения принимались равными примерно 0,01 от амплитуды напряжений в прямой волне. В первом и втором слоях расчетные точки размещались в середине слоев, а в третьем – расчетная точка размещалась на расстоянии 20 м от границы между вторым и третьим слоем.

Результаты расчетов эпюр напряжений в прямой и отраженной волнах от первой границы изображены сплошной и штриховой линиями на рис.1. Поскольку акустическая жесткость второго слоя меньше, чем первого, отражение прямой волны от его границы происходит аналогично отражению волн от свободной границы. На рис.2 сплошной линией изображены эпюры волн, распространяющихся по второй среде (в предположении ее упругости), и последовательно приходящие в точку наблюдения после преломления из первой среды во вторую, а затем после отражения от каждой границы. Так как каждое взаимодействие волн с границами сопровождается преломлением волн в смежную среду, то амплитуды

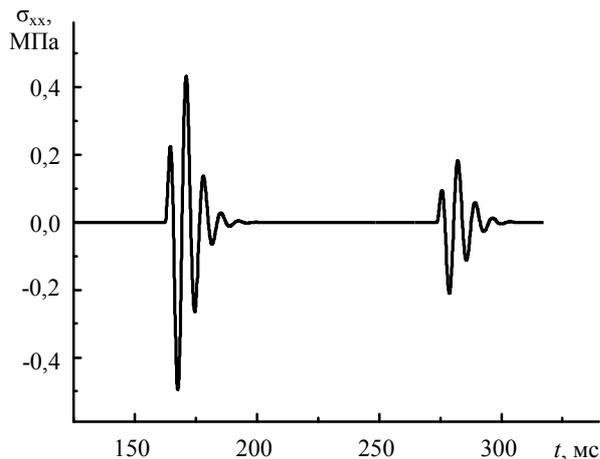


Рис.3. Эпюры преломленной волны в третью среду

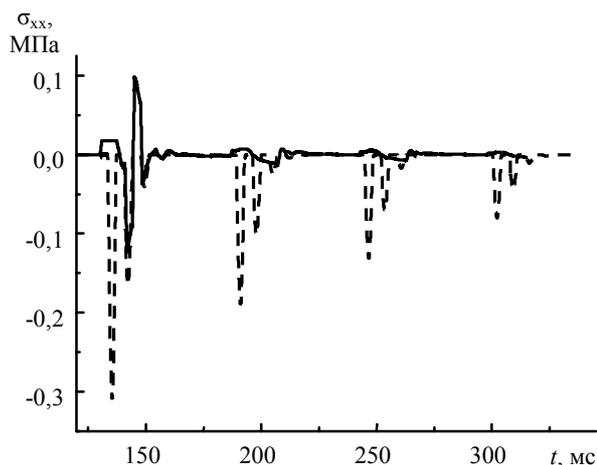


Рис.4. Эпюры преломленной и отраженной волн от границ слоя с упругопластическими и хрупкими свойствами

ды волн, распространяющихся по второй среде, последовательно убывают. На рис.3 сплошной линией изображены эпюры волн преломившихся из второй среды в третью. Причем первая волна соответствует первой, преломившейся из второй среды в третью, а вторая – второй.

На рис.4 изображены эпюры преломленных волн из первой среды во вторую в предположении, что вторая среда деформируется упругопластически (сплошная линия) или разрушается хрупко (штриховая линия), если возникающие в ней напряжения превышают критические значения. Анализ результатов расчета (рис.4) как при упругопластической деформации среды в слое, так и при хрупком разрушении среды показывает, что характерное распространение волн, аналогичное упругой среде, обладает некоторыми особенностями. В эпюре первой преломленной волны во вторую среду с упругопластическими свойствами четко просматривается «срез» эпюры с последующим пластическим течением. Если же вторая среда рассматривается как хрупкая, то при превышении критических напряжений на растяжение в ней образуются разрывы сплошности. Так как критические величины растягивающих напряжений приняты достаточно малыми, то в расчетах растягивающие напряжения оказались практически близкими к нулю. На рис.5 изображены

эпюры волн, преломившихся из второй среды в третью, в предположении, что вторая среда деформируется упругопластически (сплошная линия) или хрупко разрушается (штриховая линия). Для каждого рассматриваемого случая второй среды четко различимы две волны. Первая волна соответствует первой, преломившейся из второй среды в третью, а вторая – второй.

Таким образом, для процесса распространения продольных волн по слоистой среде с упругими, упругопластическими или хрупкими свойствами сохраняется волновой характер распространения возмущений. Трансформация эпюр преломленных волн определяется не только акустической жесткостью сред, составляющих слои, но и зави-

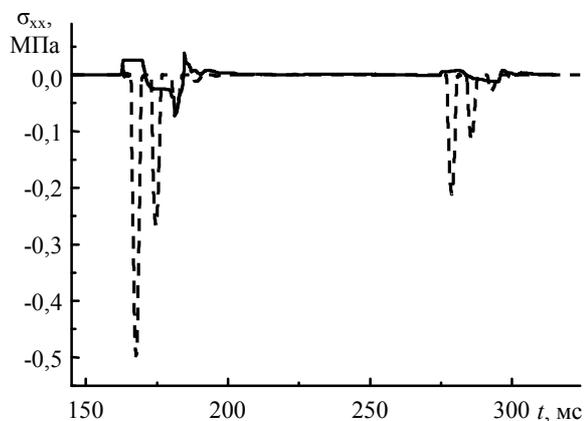


Рис.5. Эпюры преломленных волн в третью среду

сит от критических значений напряжений сжатия и растяжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Новожилов В.В.* Теория упругости. Л.: Судпромгиз, 1958. 372 с.

2. Прогнозирование параметров волн в кимберлитах на основе модели слоистых изотропных упругих сред / В.А.Боровиков, В.В.Карпенко, В.Н.Заостровцев, А.И.Шмырко // Записки Горного ин-та. СПб, 2001. Т.148(1). С.73-77.

3. *Шемякин Е.И.* К вопросу о классификации горных ударов / Е.И.Шемякин, М.В.Курленя, Г.И.Кулаков // ФТПРПИ. 1986. № 5. С.3-11.