

УДК 622.235.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУПЕРПОЗИЦИИ УПРУГИХ ВОЛН ОТ ВЗРЫВА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

*Луговой П.З., д.т.н., проф. зав. отделом, Барановский З., к.т.н., докторант
Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины, г. Киев
03057, г. Киев, ул. Нестерова, 3
E-mail: desc@inmech.kiev.ua*

На підставі теоретичних передумов за допомогою тензо- й акселерометрії проведено експериментальне моделювання взаємодії пружних хвиль від вибуху двох паралельних циліндричних зарядів. Аналіз експериментальних даних підтвердив можливість руйнування гірських порід у потрібному напрямку за рахунок дифракційних явищ.

Ключові слова: взаємодія пружних хвиль, дифракційні явища.

On the basis of theoretical assumptions with the help of tensor and accelerometer measurements the experimental simulation of elastic waves interaction is performed. The waves are initiated by two parallel cylindrical charges. Analysis of experimental data confirmed the possibility of rock material distraction in the prescribed direction through the diffraction phenomena.

Key words: simulation of elastic waves, diffraction phenomena.

Введение. Большой объем буровзрывных работ, который выполняется в горнодобывающей промышленности, требует постоянного совершенствования методов использования энергии взрыва. Так, в работе [1], на базе теории дифракции упругих волн [2] было проведено научное обоснование рационального расположения шпуровых цилиндрических зарядов для создания монотрещины в горном массиве, которую можно использовать для откола штучного камня, а также в качестве экрана для гашения взрывных и сейсмических волн. Здесь же предложено устройство нового технологического приспособления, которое позволит не только уменьшить расход ВВ и объем буровых работ, но и увеличить как производственную, так и экологическую безопасность при создании монотрещины в горном массиве. Особенности распространения взрывных волн, возникающих при ведении таких работ, хорошо изучены в монографии [3].

Поскольку выполнение таких работ требует повышенной техники безопасности при создании монотрещины с помощью динамических нагрузок, то желательно получить экспериментальное подтверждение теоретического исследования взаимодействия упругих волн от взрыва двух параллельных цилиндрических шпуровых зарядов.

Цель работы. При постановке задачи о дифракции упругих волн указывалось, что в плоскости перпендикулярной срединам осей параллельных шпуровых цилиндрических зарядов реализуются условия плоской деформации [1]. Этот факт можно использовать для экспериментального моделирования взаимодействия взрывных волн от взрыва двух соседних параллельных шпуровых зарядов на той основе, что уравнения для плоской деформации и обобщенного плоского напряженного состояния имеют одинаковую структуру и отличаются лишь

упругими постоянными [4]. Так как натуральное моделирование взаимодействия упругих волн от параллельных цилиндрических зарядов очень трудоемкое и требует значительных материальных и технических затрат, то в данной работе проводят его с помощью плоского напряженного состояния в пластине с круговыми отверстиями, для которой теоретические результаты в случае гармонических нагрузок на кромки отверстий приведены в [2].

Методика и результаты исследований. В экспериментах, вместо постоянной Ляме λ для обобщенного плоского напряженного состояния, следует взять постоянную $\lambda^* = \frac{2\lambda\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{E\nu}{(1-\nu^2)}$ и таким

образом промоделировать взаимодействие волн от одновременного взрыва двух параллельных цилиндрических зарядов.

Плоское напряженное состояние реализовывалось в пластине из органического стекла со следующими физико-механическими свойствами: плотность $\rho = 1,12 \text{ Т/м}^3$, модуль Юнга $E = 5,25 \cdot 10^9 \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Геометрические размеры пластины следующие: длина $l = 0,7 \text{ м}$, ширина $m = 0,12 \text{ м}$, толщина $h = 0,004 \text{ м}$.

Для создания динамических нагрузок на кромки отверстий использовались цилиндрические кольца из пьезокерамики ЦТС-21 со следующими размерами: внешний диаметр $d_1 = 0,03 \text{ м}$, внутренний диаметр $d_2 = 0,026 \text{ м}$, ширина кольца $H = 0,015 \text{ м}$. Кольца из пьезокерамики, боковые поверхности которых покрыты тонким слоем серебра (электроды), вклеивались в вырезанные круговые отверстия в пластине клеем из оргстекла таким образом, чтобы образующая кольца была перпендикулярна поверхности пластины и середина высоты кольца совпадала со срединной поверхностью пластины (рис.1). Прозрач-

ность оргстекла позволяла визуально контролировать качество и точность установки пьезокерамических колец.

Используемые пьезокерамические кольца характеризуются собственными резонансными и антирезонансными частотами, величины которых приведены в табл. 1. Физико-механические свойства пьезокерамики ЦТС-21 следующие: $E = 0,9^{11}$ Па, $\nu = 0,3$, $\rho = 7$ Т/м³.

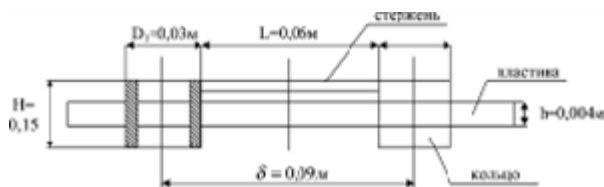


Рисунок 1 – Конструкция цилиндрического кольца ЦТС-21

Таблица 1 – Характеристики пьезоэлектрических колец

	Резонанс	Резонанс	Антирезонанс	Антирезонанс
f	40 кГц	125 кГц	42 кГц	130 кГц
U	70 мВ	40 мВ	15 мВ	10 мВ

Гармоническая нагрузка формировалась с помощью задающего генератора ГЗ-56/1, переменное напряжение от которого прикладывалось к электродам пьезокерамических колец. Для измерения распределения деформаций по перемычке между отверстиями использовалась дорожка из фольговых тензодатчиков КФ 5Ц1-3-100-В-12, чувствительность которых равна $K = 2,17$. Дорожка из этих тензодатчиков наклеивалась по линии O_1, O_2 согласно схеме рис. 2. Учитывая безинерционность фольговых тензодатчиков ими можно измерять колебательные процессы с частотой от 0 до 150 кГц. Датчик, который измерял деформацию, наклеивался в радиальном направлении по отношению к центру пьезокерамического кольца (рис. 1). Этот измеряющий датчик включался в мостовую схему, в которой компенсирующий датчик находился в условиях измеряющего датчика. Для запитки мостовой схемы использовался источник питания Б 5-47.

С помощью разработанной выше экспериментальной методики были получены данные для стационарных задач, теоретические решения которых приведены в [2]. Удовлетворительное качественное и количественное совпадение полученных экспериментальных данных и известных теоретических решений задач о действии гармонических нагрузок на кромки отверстий [2] подтвердило работоспособность предложенной экспериментальной методики.

При экспериментальных исследованиях нестационарных задач моделирование взрывных нагрузок происходило следующим образом. К серебряным электродам мгновенно прикладывалось постоянное напряжение 25В от аккумулятора. При этом практически мгновенно происходило расширение пьезокерамических колец и происходил удар по направлению нормали к кромкам отверстий пластины. Ам-

плитуду этого удара можно определить расчетным путем:

$$\Delta R = 0,00001 \text{ м}; \quad P = 42 \cdot 10^3 \text{ Па.}$$

Расчетные данные по определению амплитуды импульса давления мгновенно приложенного к контуру отверстия тестировались экспериментальным путем с помощью фольговых тензодатчиков КФ 5П1-1-200-В-12, коэффициент тензочувствительности которых $K = 2,12$.

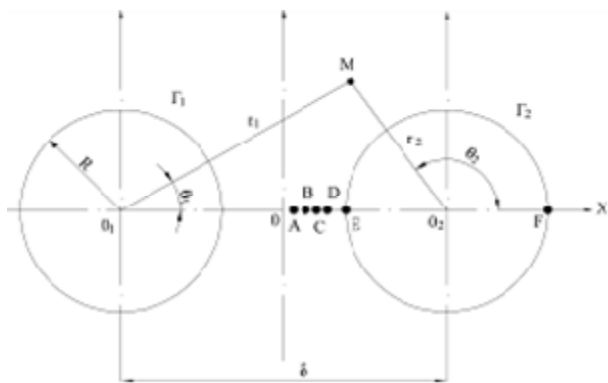


Рисунок 2 – Схема размещения тензодатчиков КФ 5Ц1-3-100-В-12

Результаты измерений деформаций регистрировались на экране осциллографа С8-13. Графики "деформация – время", которые записывались на экране осциллографа, фотографировались цифровым фотоаппаратом, позволяющего вывод фотоснимка на компьютер с последующей его цифровой обработкой.

Регистрация механического действия пьезокерамических колец на пластинку из органического стекла дублировалась с помощью акселерометров АП-19, показания которых также регистрировались с помощью осциллографа С8-13. С помощью таких акселерометров можно измерить нестационарные колебания с полуразмахом ускорений $5 \cdot 10^5$ м/с² при действии импульсов полусинусоидальной формы длительностью $(25-60) \cdot 10^{-6}$ с.

Сигнал с акселерометров передавался с помощью антивибрационного кабеля АВК-3, что позволило избежать возникновения кабельного эффекта и обеспечить погрешность экспериментов в диапазоне до 10%.

На рис. 3 приведена осциллограмма "деформация – время", записанная с помощью тензодатчика в точке D (рис. 2.), когда напряжение подавалось только на правое кольцо.

Максимальная амплитуда деформаций $\epsilon_x = 0,01$, а частота колебаний равна $\omega = 125$ кГц. Аналогичная запись деформация-время рис. 4 проведена в точке F возле левого кольца (рис. 2), когда напряжение подавалось только на левое кольцо. Из анализа осциллограммы деформационного процесса в точке D следует, что частота колебаний практически совпадает с частотой колебательного процесса в точке F, но амплитуда колебаний в точке D в два раза больше, чем в точке F. Это говорит о том, что качество изготовления пьезокерамических колец и нанесение

серебряного покриття, а також способ вклеивания колец в пластину из оргстекла значительно влияет на характер действия кольца на пластину.

Отметим, что аналогичная картина разброса амплитуд деформаций наблюдается и при взрыве шпуровых зарядов, т.к. невозможно изготовить два идеально одинаковых заряда.

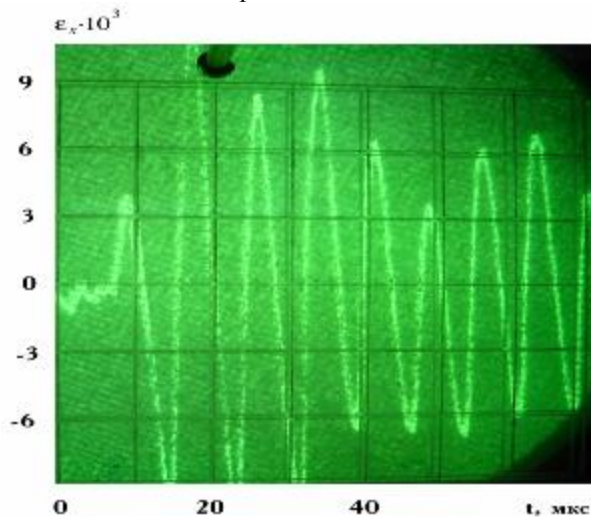


Рисунок 3 – Осциллограмма "деформация – время" с подачей напряжения на правое кольцо

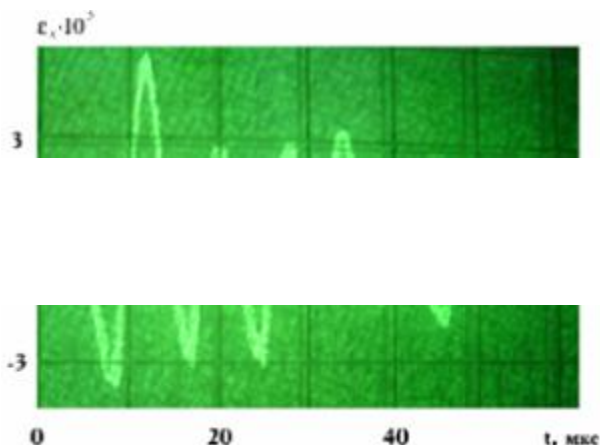


Рисунок 4 - Осциллограмма "деформация – время" с подачей напряжения на левое кольцо

На рис. 5 дается картина взаимодействия волн в точке О (рис. 2), когда к электродам обоих колец напряжение прикладывалось одновременно. Из осциллограммы следует, что в точке О за счет суперпозиции волн их амплитуда не ниже, чем в точке Д. Частота колебательного процесса также равна 125 кГц, но затухание колебаний в точке О значительно меньше, чем в точках Д и F. Это говорит о том, что за счет суперпозиции волн от действия обоих колец в точке О создаются условия более благоприятные для разрушения пластины, чем в точках Д и F. Это явление можно использовать для создания монотрещины, проходящей через оси шпуровых зарядов. Для данной конструкции пластины с кольцами можно оценить собственную частоту перемишки между ближайшими точками двух соседних круговых от-

верстий. Согласно формуле $\omega = \frac{\pi \cdot c_0}{l}$, для случая

пластины из органического стекла, она равна – $\omega = 120$ кГц.

Эта частота практически совпадает со второй резонансной частотой пьезокерамического кольца. Поэтому наибольшего механического эффекта действия пьезокерамического кольца на пластину из оргстекла можно ожидать в диапазоне 120 кГц.

Рисунок 5 – Взаимодействие волн при одновременном наложении напряжения на оба кольца

На рис. 6 показана картина колебаний точки Д пластины из оргстекла при приложении на электроды пьезокерамических колец напряжения в 25 В от аккумуляторов. Амплитуда полуразмаха ускорений равна $5 \cdot 10^2$ м/с², а частота – $\omega \approx 120$ кГц.

Аналогичная картина для точки F показана на рис. 6. Сравнивая показания первого и второго акселерометра видим, что амплитуда ускорений точки Д в два раза выше, чем у точки F, что говорит о трудности обеспечения идентичности нагрузок от пьезоэффекта колец. Аналогичная картина расхождения величин нагрузок наблюдается при взрыве двух параллельных цилиндрических шпуровых зарядов. Так как напряжение на электроды пьезокерамических колец подается практически одновременно, то встреча волновых фронтов от механического действия пьезокерамических колец произойдет через

$$\frac{0,03 \text{ м}}{2,300 \text{ м/с}} = 13 \text{ мкс}.$$

На рис. 7 показана картина взаимодействия волновых процессов в точке О (рис. 2) от левого и правого кольца. Анализируя эту картину видим, что суперпозиция этих волновых фронтов усиливает механический эффект в точке О на 40% по сравнению с усредненными показателями акселерометров в точках Д и F.

Для подтверждения достоверности полученных результатов для пластины из оргстекла с отверстия-

ми были проведены следующие испытания. По линии O_1, O_2 (рис. 2, рис. 8) между пьезокерамическими кольцами клеивался стержень из оргстекла, который вырезался из испытываемой пластины: длина стержня $L = 0,06$ м, ширина $H_c = 5 \cdot 10^{-3}$ м, толщина $h = 25 \cdot 10^{-4}$ м.

Акселерометры АП-19 устанавливались на плоскости стержня (рис. 8) против точек F и O пластины (рис.2) и проводились аналогичные измерения ускорений при действии нестационарных электроимпульсов. Из осциллограмм, приведенных на рис. 9, следует, что частоты колебательных процессов в пластине и стержне совпадают. Следовательно для оценки собственной частоты перемычки можно использовать формулу $\omega = \frac{P \cdot c_0}{d - D_1}$. Так как жесткость

перемычки выше, чем жесткость стержня, то амплитуды ускорений на 20% выше для колебательных процессов в стержне, чем в перемычке.

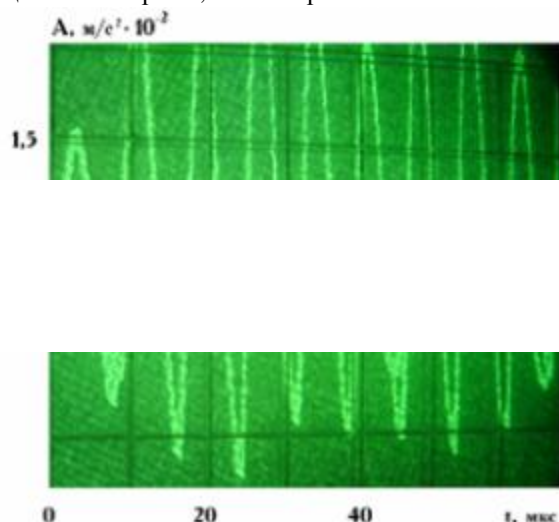


Рисунок 6 – Картина колебаний при приложении на электроды напряжения 25 В

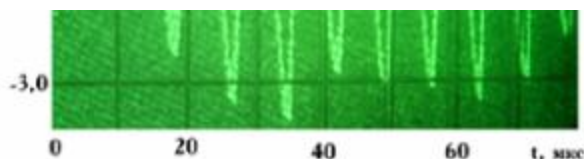


Рисунок 7 – Картина взаимодействия волновых процессов от левого и правого кольца

Выводы. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что при соответствующем

подборе динамических нагрузок на контуры соседних круговых отверстий в пластине из оргстекла можно достичь за счет суперпозиции волн, инициируемых круговыми пьезокерамическими кольцами, разрушающих напряжений на середине перемычки между отверстиями.

Это говорит о том, что при соответствующем подборе конструкции параллельных деформации, что создаст условия для образования монотрещины, цилиндрических шпуровых зарядов и способа из подрывания можно достичь суперпозиции волн и в случае плоской проходящей через оси шпуровых зарядов при значительном рассредоточении линий их заложения.



Рисунок 8 – Акселерометр АП-19

Рисунок 9 – Частоты колебательных процессов в пластине и стержне

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравец В.Г. Ган А.Л., Луговой П.З., Барановский З. Динамика формирования монотрещины взрывом в горном массиве // Вісник НТУУ (КПІ). Серія "Гірництво", Вип. 13. – Київ, 2006. – С. 18-23.
2. Гузь А.Н., Кубенко В.Д., Черевко М.А. Дифракция упругих волн. – К.: Наук. думка, 1978. – 308 с.
3. Chudek V., Guljaew V.I., Lugowoj P.Z. et al. Opracowanie metody okreslania wplywu wstrzasow (tapniec) w goritworze na stan naprezeniowo-odkształceniowy wyrobisk korotarzowych wraz z kryterium dynamicznej utraty icy stateczności. - Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, 2006. – 451 p.
4. Божидарник В.В., Сулим Г.Т. Элементы теории пружности. - Львів: Вид-во «Світ», 1994. – 560 с.

Статья поступила 1.10.2007

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Комиром В.М.