

Ж. К. МАСАНОВ, Л. Б. АТЫМТАЕВА, Г. С. МЫРЗАХМЕТОВА, Б. Е. ЯГАЛИЕВА

# АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЗАИМОВЛИЯЮЩИХ КРУГОВЫХ ВЫРАБОТОК С ЖЕСТКОЙ ОБДЕЛКОЙ В АНИЗОТРОПНОМ МАССИВЕ ПРИ СТАЦИОНАРНОЙ ДИФРАКЦИИ SH-ВОЛН

(Представлена академиком НАН РК Ж. Ж. Байгунчековым)

Работа посвящена анализу исследований по определению напряженно-деформированного состояния упругого транстропного массива с наклонной плоскостью изотропии, содержащем серию выработок кругового профиля с жесткой обделкой, оказывающих взаимовлияние друг на друга, при стационарной дифракции упругих SH-волн сдвига и антиплоской деформации. Показано влияние граничных условий, физико-механических свойств среды и падающих волн, влияние расположения выработок друг относительно друга и их размеров, на напряженно-деформированное состояние анизотропного массива в окрестности выработок. На основании строгих аналитических решений задач динамики анизотропного многосвязного массива получены новые эффекты и закономерности распределения напряжений и перемещений на контурах выработок, подкрепленных жесткой обделкой, выработаны рекомендации.

Развитие различных областей машиностроения, механики горных пород, строительство подземных сооружений, подвергающихся динамическим нагрузкам, развитие новых композитных материалов и внедрение их при создании инженерных сооружений, современные задачи геофизики и сейсмологии, а также ряд других тенденций научно-технического характера способствовали повышению актуальности проблем динамики деформируемых тел.

К числу наиболее сложных и актуальных с точки зрения приложений проблем динамики деформируемых твердых тел относится проблема дифракции упругих волн на различного типа неоднородностях. В частности, это касается проблем механики горных пород и строительства подземных сооружений, моделируемых обычно в виде неоднородностей (полостей) в сплошной среде. Сплошная среда, в данном случае, представляет собой массив с различными физико-

механическими свойствами. Природная, конструкционная и деформационная анизотропия физико-механических свойств присуща в определенной мере большинству материалов, в том числе горным породам с учетом способа их напластования и залегания. Учет анизотропии при исследовании динамических процессов деформирования обуславливает более адекватные представления о качественном характере напряженного состояния упругих тел и их волноводных свойствах, позволяет получить более достоверные количественные оценки.

Часто подземные сооружения типа выработок, тоннелей, подкрепляются различными типами обделок, что позволяет оптимально спроектировать подземные сооружения, а также улучшить их эксплуатационные свойства.

В данной статье рассматривается анализ динамического напряженно-деформированного состояния двух штреекообразных протяженных горизонтальных выработок кругового сечения, глубоко заложенных в анизотропном массиве, подкрепленных недеформируемой крепью, при стационарной дифракции упругих SH-волн сдвига (рис. 1).

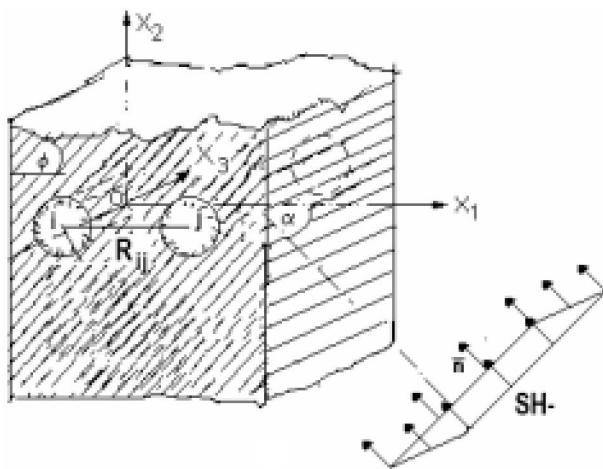


Рис. 1

Для получения основных уравнений и решений исследуемой задачи используются методы теории упругости, методы теории функций комплексных переменных, теории разложения цилиндрических функций [2], метод возмущения формы, метод аффинных преобразований координат [3]. Из обобщенных уравнений закона Гука, с помощью преобразований уравнений движения, получаются уравнения в частных производных

второго порядка, сводимые с помощью аффинных преобразований к уравнению Гельмгольца [3]. Решения уравнения Гельмгольца ищутся в рядах по цилиндрическим функциям Бесселя и функциям Ханкеля 1-го рода, затем, для получения бесконечной системы алгебраических уравнений, используются граничные условия (решение второй основной задачи, когда контуры выработок подкреплены абсолютно жесткой крепью) и представления компонентов напряженно-деформированного состояния на контурах выработок [4].

Динамический анализ напряженного и деформированного состояния двух круговых выработок проводился для транстронного массива (алевролит) с наклонной под углом  $\phi$  плоскостью изотропии. Упругие характеристики пород принимались следующими:  $E_1 = 1,074 \cdot 10^5 \text{ кг}/\text{см}^2$ ,  $E_2 = 0,523 \cdot 10^5 \text{ кг}/\text{см}^2$ ,  $G_2 = 0,12 \cdot 10^5 \text{ кг}/\text{см}^2$ ,  $v_1 = 0,413$ ,  $v_2 = 0,198$ . Волна распространялась под углом  $\alpha = 0^\circ$ ; изменение частот бралось в диапазоне от 1 до 100 Гц, изменение угла наклона плоскости изотропии  $\phi$  – от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Алгоритм и пакет прикладных программ разработан в среде Matlab 7.0.

Результаты расчета нормальных и касательных напряжений  $|\sigma_{zz}|$ ,  $|\sigma_{\theta z}|$ , а также продольных перемещений  $u_z$  на контурах круговых выработок получены на базе решения методом редукции бесконечных систем линейных алгебраических уравнений [4], в которых удерживалось не более 16 уравнений. Это позволило удовлетворить граничным условиям с погрешностью менее 1% (с точностью до  $10^{-4}$ ) для продольных перемещений  $u_z$  по отношению к максимальным амплитудным значениям перемещений  $u_z^*$  в падающей волне. Отсечение членов ряда происходило по мере удовлетворения граничным условиям. Целесообразность выбора метода редукции при решении бесконечных систем линейных алгебраических уравнений, например, может быть продемонстрирована на примере вклада в коэффициентов при неизвестных в системе линейных уравнений в основное решение [5].

Составленная программа тестировалась на результатах подобных задач для одиночных и парных круговых полостей в ортотропном массиве, исследуемой А. С. Космодамианским и В. И. Сторожевым [3], и на результатах задачи для одиночной круговой выработки в изотропном

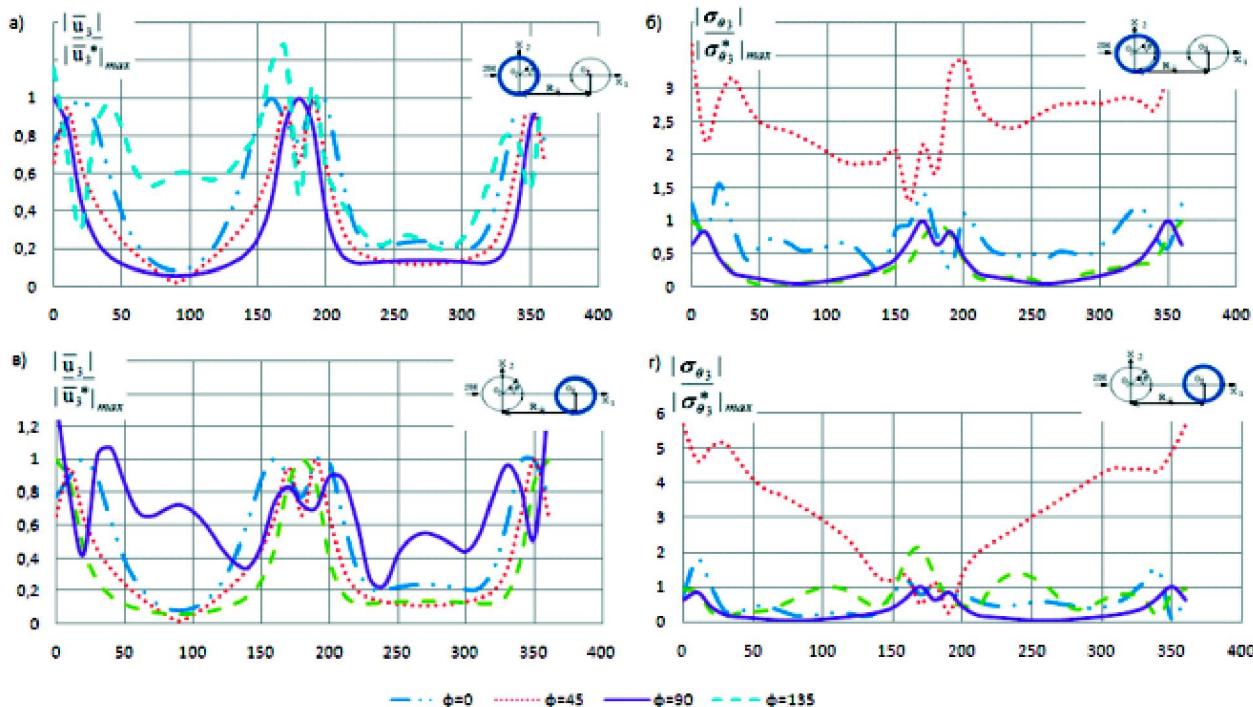


Рис. 2

массиве, исследуемой Ж. С. Ержановым, Ш. М. Айталиевым, Л.А. Алексеевой [6]. Расчеты показали, что расхождение в полученных численных результатах качественной и количественной картины составило не более 1%. Программа также тестировалась на результатах для одиночной выработки, полученной в работе [5]. Расчеты показали, что при увеличении перемычки между выработками на расстояние более 10-12R количественная и качественная картина дает результаты, аналогичные результатам для одиночной выработки, подкрепленной недеформируемой крепью, с расхождением менее, чем 1%. Таким образом, при величине перемычки в 10-12R исследуемое напряженно-деформированное состояние характерно для одиночных выработок.

На рис. 2 приведены значения продольных перемещений  $u_3$  и касательных напряжений  $|\sigma_{\theta_3}|$  на двух выработках с недеформируемой обделкой при падении на выработки под углом  $\alpha = 0^\circ$  плоской SH-волны. На графике показано влияние угла наклона плоскости изотропии  $\phi$  на амплитудные характеристики продольных перемещений  $u_3$ , отнесенных к максимальным перемещениям в падающей волне, в левой (рис. 2, а) и правой выработках (рис. 2, в), а также напряжений  $|\sigma_{\theta_3}|$ , отнесенных к максимальным напряжениям

$|\sigma_{\theta_3}^*|$  в падающей волне, соответственно в левой (рис. 2, б) и правой выработках (рис. 2, г). Частота волны бралась  $\omega = 15$  Гц. При проведении исследований фиксировался угол падения волны ( $\alpha = 0^\circ$ ) и изменялся лишь угол наклона плоскости изотропии  $\phi$ . Можно отметить симметрию картины распределения продольных перемещений относительно расположения плоскости изотропии на левой и правой выработках. В случае распределения касательных напряжений  $|\sigma_{\theta_3}|$  наблюдается значительное увеличение смещений в зоне перемычки между выработками и в боках выработок. При угле наклона плоскости изотропии  $\phi = 45^\circ$  наблюдается максимальное распределение напряжений, причем на левой выработке, находящейся в зоне «света» больше, чем на правой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Масанов Ж.К. Сейсмонапряженное состояние подземных сооружений в анизотропном слоистом массиве. Алма-Ата: Наука, 1980. 213 с.
2. Гузь А.Н., Кубенко В.Д., Черевко М.А. Дифракция упругих волн. Киев: Наукова думка, 1978. 310 с.
3. Космодамианский А.С., Сторожев В.И. Динамические задачи теории упругости для анизотропных сред. Киев: Наукова думка, 1985. 178 с.
4. Atymtayeva L., Masanov Zh., Yagaliyeva B., Myrzakhetova G. Stationary diffraction of elastic SH-waves onto

mutually influencing cavities of arbitrary structure and deep lying in transtropic massif // Proceedings of the 3rd IASME / WSEAS International Conference on CONTINUUM MECHANICS (CM'08). Cambridge, UK, February 23-25, 2008. Р. 5-9.

5. Аттымтаева Л.Б. Стационарная дифракция упругих SH-волн сдвига в транстропном массиве с выработкой произвольного профиля при антиплоской деформации: Автoreф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Алматы, 2001. 25 с.

6. Ержанов Ж.С., Айтмалиев Ш.М., Алексеева Л.А. Динамика тоннелей и подземных трубопроводов. Алма-Ата: Наука, 1989. 240 с.

### **Резюме**

Мақала антижазық деформацияда және серпімді SH-толқын жылжуының стационарлық дифракциясында, бір-біріне өзара әсер етегін қатты қантамамен шенберлі профилді қазбалар тоғтамасы бар, изотропияның көлбейу жазықтықтарымен серпімді транстропты тау жынысының кернеулік-деформациялық күйін анықтау бойынша зерттеулер талдауына арналған. Жұмыста шекаралық шарттар әсері, құлау толқындары және орталардың физика-механикалық қасиеттері, қазбалар айналасын-дагы анизотропты тау жынысының кернеулік-деформа-

циялық күйіне олардың өлшемдері және бір-біріне қатысты қазбалардың орналасырылу әсері көрсетілген. Жұмыста қатты қантамамен бекітілген қазбалар контурында орын ауыстыру мен кернеулердің таралу зандылықтары және анизотроптық көп байланысты тау жынысы динамикасының әсептерін қatal аналитикалық шешімдері негізінде жана нәтижелер алынған, ұсыныстар жасалған.

### **Summary**

The article is devoted to the research analysis on identifying of stress-strain condition of elastic transtropic massif with inclined plane of isotropy, which contains a number of supported by undeformable lining circular mine roadways at case of antiplane deformation and stationary diffraction of elastic SH-waves. In this paper, we can observe the impact of boundary conditions, of physical and mechanical massif and waves properties, of mine roadways placement and size into stress-strain conditions of massif close to mine roadways. On base of rigorous analytical solutions of the dynamics of anisotropic multilinked massif the new effects and regularities of distribution of stresses and deformations on supported by rigid lining mine roadway contours are obtained, the recommendations are proposed.

УДК 622.011.4; 622.023+539.3

*Институт механики и машиноведения  
им. У. А. Джолдасбекова,  
г. Алматы*

*Поступила 02.06.02.*