

УДК 539.3

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД С ВЫРАБОТКОЙ И ГАЗОЗАПОЛНЕННЫМИ ТРЕЩИНАМИ ВБЛИЗИ ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

Калоеров С. А., докт. физ.-мат. наук, проф.,

Баева А. И., канд. физ.-мат. наук,

Глущенко Ю. А., канд. физ.-мат. наук

Донецкий национальный университет

С использованием обобщенных комплексных потенциалов двумерной задачи теории упругости анизотропного тела, конформных отображений и метода наименьших квадратов получено решение задачи теории упругости и исследовано напряженно-деформированное состояние массива горных пород с выработкой, вокруг которой имеются газозаполненные трещины. Приведенные результаты численных исследований по распределению напряжений и изменению коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) могут быть использованы для определения критических давлений газа на стенки трещин, когда они начнут расширяться, что приведет к выбросам пород в выработанное пространство.

Using the generalized complex potentials of a two-dimensional elasticity theory of an anisotropic body, conformal mappings and the least squares method the solution of elasticity theory problem is obtained and stress-deformed state of rocks massif with manufacture is investigated. There are cracks filled by gas around the manufacture. The results of numeric research of stresses distribution and change of the stress intensity factors are given. These results can be used for definition of critical gas pressure on the walls of cracks, when cracks start to extend and when the throws of rocks in manufactured space happen.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Добыча угля в условиях Донбасса в настоящее время в основном проводится на больших глубинах. Но с ростом глубины увеличивается интенсивность горного давления, а следовательно, и концентрация напряжений вблизи поверхностей очистных, подготовительных и капитальных выработок. Кроме того, вблизи поверхностей выработок возникают газозаполненные трещины, приводящие к появлению дополнительных напряжений, которые, в свою очередь, могут приво-

дить к выбросам породы в выработанное пространство. Поэтому при проведении таких выработок необходимо знать распределение напряжений и деформаций около выработок, чтобы планировать мероприятия по разгрузке вокруг них.

Анализ исследований и публикаций. В работах [1, 2] предложена методика исследования напряженного состояния многосвязного анизотропного тела с отверстиями и трещинами при произвольном их расположении и сочетании. С использованием этой методики в [3, 4] проведены исследования напряженного состояния анизотропного горного массива с выработкой и разгрузочными щелями. В статье [5] дано решение задачи для пластинки с круговым отверстием, вокруг которого циклическим образом расположены эллиптические отверстия или трещины, указаны его приложения к исследованию напряженного состояния массива горных пород с выработкой и множеством газозаполненных трещин вокруг него, получено, что максимальных значений критические напряжения достигают в случае одной или двух противоположно расположенных диаметральных трещин, параллельных горизонту. В данной работе исследуется обобщенное плоское напряженное состояние анизотропного горного массива с выработкой сводчатой формы и внутренней газозаполненной трещиной (рисунок).

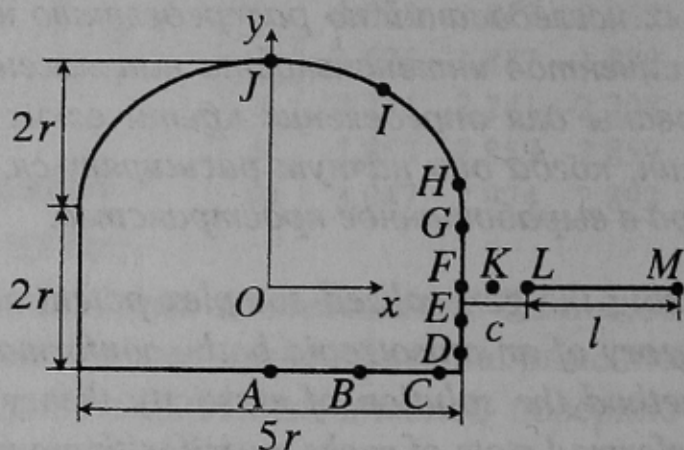


Рисунок – Сечение массива с выработкой сводчатой формы и трещиной

Постановка задачи. Рассмотрим горный массив с горизонтальной выработкой и внутренней трещиной вдали от дневной поверхности, влияние которой на напряженное состояние около выработки мало. Будем считать, что на большой глубине в массиве без выработки для напряжений имеют место равенства [4]

$$\sigma_y^\infty = -\gamma H, \quad \sigma_x^\infty = -\lambda \gamma H, \quad \tau_{xy}^\infty = 0, \quad (1)$$

где γ – средний удельный вес горных пород; H – расстояние до дневной поверхности; λ – коэффициент бокового распора. Поверхность выработки свободна от внешних усилий и не подкреплена, на

поверхности трещины действует равномерное давление интенсивности q , создаваемое заполняющим ее газом.

Исходя из результатов исследований [3], выработку будем считать сводчатой формы, трещину-разрез – предельным случаем эллипса, одна из полуосей которого весьма мала (в пределе равна нулю); контур свода будем рассматривать совокупностью дуг эллипсов или прямолинейных разрезов (узких эллипсов). В связи с этим рассматриваемая задача будет сводиться к определению напряженного состояния бесконечного многосвязного анизотропного тела с пятью эллиптическими полостями, четыре из которых создают контур выработки, пятая – представляет трещину-разрез (рисунок).

Изложение материала и результаты. Для определения напряженного состояния рассматриваемого тела будем использовать обобщенные комплексные потенциалы двумерной задачи теории упругости анизотропного тела. В данном случае для этих потенциалов получаются следующие выражения [1, 2]:

$$\Phi'_k(z_k) = \Gamma_k - \sum_{l=1}^5 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n a_{kln}}{\zeta_{kl}^{n-1} R_{kl} (\zeta_{kl}^2 - m_{kl})} \quad (k = \overline{1, 3}), \quad (2)$$

где Γ_k – известные постоянные, определяемые из условий на бесконечности; ζ_{kl} – переменные, вычисляемые из соотношений

$$z_k = z_{0kl} + R_{kl} (\zeta_{kl} + m_{kl} / \zeta_{kl}); \quad (3)$$

$$z_{0kl} = x_{0l} + \mu_k y_{0l};$$

$$R_{kl} = \frac{a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) + i b_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)}{2},$$

$$m_{kl} = \frac{a_l (\cos \varphi_l + \mu_k \sin \varphi_l) - i b_l (\sin \varphi_l - \mu_k \cos \varphi_l)}{2R_{kl}}; \quad (4)$$

x_{0l} , y_{0l} и a_l , b_l ($l = \overline{1, 5}$) – координаты центра L_l в декартовой системе координат $Oxuz$ и полуоси эллипса L_l ; φ_l – угол наклона большей полуоси a_l к оси Ox ; μ_k – корни характеристического уравнения; a_{kln} – неизвестные коэффициенты, определяемые из граничных условий на контурах отверстий и трещин [1, 2]

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 g_{ki} \delta_k \Phi'_k(t_k) = f_{il}(t) \quad (i = \overline{1, 3}) \text{ на } L_l, \quad (5)$$

где g_{ki} и δ_k – величины, зависящие от анизотропии материала тела и формы контура; $f_{il}(t)$ – функции, характеризующие нагрузку на контурах отверстий.

Используя метод наименьших квадратов, из граничных условий (5) получим систему линейных алгебраических уравнений [1, 2] для определения неизвестных постоянных a_{kln} , входящих в (2). После решения этой системы комплексные потенциалы (2) станут известными, что позволит найти напряжения, а также КИН [1, 2]

$$\begin{aligned} k_1 &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2r} \left[\sigma_x \sin^2 \varphi_l + \sigma_y \cos^2 \varphi_l - 2\tau_{xy} \cos \varphi_l \sin \varphi_l \right], \\ k_2 &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2r} \left[(\sigma_y - \sigma_x) \sin \varphi_l \cos \varphi_l + \tau_{xy} (\cos^2 \varphi_l - \sin^2 \varphi_l) \right], \\ k_3 &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2r} (\tau_{yz} \cos \varphi_l - \tau_{xz} \sin \varphi_l). \end{aligned} \quad (6)$$

2. Анализ результатов численных исследований. Были проведены подробные численные исследования распределения напряжений и изменения КИН вокруг выработки с трещиной (рисунок) в горном массиве из алевролита с упругими постоянными $E_1 = 10,74$ ГПа, $E_2 = 5,23$ ГПа, $G_2 = 16$ ГПа, $\nu_1 = 0,413$, $\nu_2 = 0,198$ и коэффициентом бокового распора $\lambda = 0,7$. При этом длина основания считалась равной $5r$, боковых сторон – $2r$, высота купола свода – $2r$ (т.е. высота всей выработки – $4r$), где r – масштабная единица длины. Учитывая, что исходная задача является линейной, отдельно исследовалось напряженно-деформированное состояние от нагрузки (1) и от внутреннего давления на берегах трещины. Ниже в таблицах приведены результаты для этих случаев. При этом приводимые значения напряжений и КИН для двустороннего сжатия даны с точностью до множителя γH , в случае внутреннего давления на берегах трещины – с точностью до множителя q . Поэтому для получения решения общей задачи при совместном действии этих усилий нужно соответствующие значения напряжений и КИН в таблицах умножать на γH и на q и складывать. Тогда будем иметь

$$\sigma = \gamma H \sigma_H + q \sigma_q, \quad k_l = \gamma H k_{lH} + q k_{lq}, \quad (7)$$

где величины со значком H относятся к двустороннему сжатию усилиями (1), со значком q – к внутреннему давлению.

В табл. 1 приведены значения напряжений и КИН в некоторых характерных точках, в качестве которых принимались $A(0; -r)$, $B(1,77r; -r)$, $C(2,41r; -r)$, $D(2,5r; -0,97r)$, $E(2,5r; -0,71r)$, $F(2,5r; 0)$, $G(2,5r; 0,71r)$, $H(2,5r; 0,97r)$, $I(1,77r; 2,41r)$, $J(0; 3r)$, $K(2,5r + c/2; 0)$, $L(2,5r + c; 0)$, $M(2,5r + c + l; 0)$ в зависимости от расстояния c между выработкой и трещиной (рисунок). При этом длина трещины l считалась равной r , приведенные выше координаты точек получены для соответствующих значений параметра параметрического задания каждого из эллипсов. В табл. 2 приведены аналогичные данные для случая, когда при постоянном расстоянии $c = 0,1$ изменялась длина трещины l .

Таблица 1 – Значения напряжений в характерных точках в зависимости от длины перемычки

c	Точки													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
	σ_{θ}										σ_x	σ_y	k_1^+	k_1^-
Двустороннее сжатие														
∞	0,06	-0,23	-2,39	-5,09	-2,40	-1,83	-1,81	-1,56	-1,31	-1,40	-0,70	-1,00	-0,707	-0,707
2,0	0,08	-0,20	-2,36	-5,20	-2,47	-1,83	-1,86	-1,57	-1,30	-1,40	-0,32	-1,66	-0,909	-0,868
1,0	0,09	-0,21	-2,28	-5,31	-2,61	-1,84	-2,01	-1,70	-1,29	-1,39	-0,36	-2,06	-1,069	-0,975
0,5	0,11	-0,15	-2,08	-5,29	-2,80	-1,92	-2,30	-2,23	-1,24	-1,38	-0,67	-2,59	-1,244	-1,084
0,3	0,16	-0,15	-2,01	-5,06	-2,82	-2,23	-2,44	-2,55	-1,22	-1,37	-1,18	-3,20	-1,364	-1,153
0,2	0,13	-0,23	-2,01	-4,78	-2,58	-2,68	-2,11	-0,71	-1,23	-1,36	-1,83	-3,78	-1,417	-1,181
0,1	0,07	-0,35	-2,05	-4,34	-2,34	-3,96	-1,67	1,27	-1,28	-1,35	-3,52	-5,20	-1,461	-1,184
Внутреннее давление на берегах трещины														
∞	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,707	0,707
2,0	0,00	-0,01	-0,01	0,09	0,05	0,00	0,05	0,05	-0,01	-0,01	0,08	0,07	0,709	0,708
1,0	-0,01	-0,04	-0,09	0,16	0,14	0,01	0,14	0,09	-0,03	-0,01	0,18	0,18	0,716	0,713
0,5	-0,02	-0,03	-0,17	0,13	0,24	0,04	0,24	0,00	-0,04	-0,01	0,39	0,42	0,735	0,722
0,3	-0,02	0,00	-0,20	0,00	0,24	0,20	0,22	-0,40	-0,04	-0,02	0,67	0,73	0,760	0,730
0,2	-0,02	0,02	-0,21	-0,16	0,16	0,47	0,14	-0,76	-0,04	-0,02	1,02	1,07	0,783	0,733
0,1	0,01	0,08	-0,19	-0,41	-0,03	1,16	-0,09	-1,77	-0,01	-0,03	1,93	1,84	0,798	0,720

Из данных табл. 1, 2 следует, что приближение трещины к поверхности выработки и увеличение ее длины приводит к увеличению значений напряжений вблизи выработки, в точках перемычки между выработкой и трещиной, а также КИН для вершин трещины, причем в случае двустороннего сжатия значения этих величин существенно больше. Около купола и основания свода значения напряжений изменяются незначительно.

Таблица 2 – Значения напряжений в характерных точках в зависимости от длины трещины

$\frac{l}{r}$	Точки													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
r	σ_{θ}										σ_x	σ_y	k_1^+	k_1^-
Двустороннее сжатие														
0,1	0,09	-0,36	-2,48	-5,08	-2,40	-2,06	-1,86	-1,92	-1,38	-1,38	-0,47	-2,24	-0,432	-0,431
0,3	0,08	-0,26	-2,37	-4,73	-2,24	-2,72	-1,61	-0,75	-1,32	-1,38	-1,50	-3,14	-0,779	-0,743
0,5	0,08	-0,33	-2,35	-4,61	-2,19	-3,20	-1,55	-0,06	-1,31	-1,37	-2,27	-3,89	-1,029	-0,928
1,0	0,07	-0,35	-2,05	-4,34	-2,34	-3,96	-1,67	1,27	-1,28	-1,35	-3,52	-5,20	-1,461	-1,184
2,0	0,03	-0,37	-1,45	-4,50	-2,85	-4,54	-1,52	6,23	-1,20	-1,32	-4,65	-6,41	-1,882	-1,405
Внутреннее давление на берегах трещины														
0,1	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,02	0,12	-0,02	-0,03	0,00	0,00	0,24	0,20	0,228	0,227
0,3	0,00	0,03	0,00	-0,13	-0,09	0,47	-0,09	-0,31	0,00	-0,01	0,80	0,69	0,416	0,399
0,5	0,00	0,04	-0,03	-0,26	-0,11	0,74	-0,11	-0,62	0,00	-0,01	1,22	1,11	0,553	0,517
1,0	0,01	0,08	-0,19	-0,41	-0,03	1,16	-0,09	-1,77	-0,01	-0,03	1,93	1,84	0,798	0,720
2,0	0,04	0,13	-0,57	-0,30	0,30	1,49	-0,33	-5,95	-0,06	-0,05	2,58	2,66	1,063	0,990

Исходя из данных табл. 1, 2, легко найти суммарные напряжения и КИН (7) для каждой точки. По этим суммарным величинам легко увидеть, при каком соотношении между γH и q вблизи поверхности выработки возникнут растягивающие (положительные) напряжения, приводящие к выпучиванию породы, и положительные КИН, которые могут привести к распространению трещины. Так, если $q > 3,5\gamma H$, то в окрестности точки F на поверхности выработки напротив трещины может происходить выпучивание породы, а рас-

пространение трещины в зоне перемычки может начинаться даже, когда $q > 2\gamma H$.

Выводы и направления дальнейших исследований. Таким образом, предложена методика определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород вблизи выработок при учете горного давления для больших глубин и наличия газонаполненных трещин. Установлены соотношения между интенсивностями горного давления и давления газа на стенки трещин, при которых трещины могут развиваться, что приведет к выбросам горных пород в выработанное пространство. Предложенная методика может использоваться для исследований напряженно-деформированного состояния вокруг горных выработок с целью разработки рекомендаций по снижению концентрации напряжений вокруг выработок проведением различных разгрузочных полостей или подкреплением поверхностей выработок.

Список источников.

1. Калоеров С. А., Горянская Е. С. Двумерное напряженное состояние многосвязного анизотропного тела с полостями и трещинами // Теорет. и прикладная механика. – 1995. – Вып. 25. – С. 45-56.
2. Калоеров С. А., Горянская Е. С. Двумерное напряженно-деформированное состояние многосвязного анизотропного тела // Концентрация напряжений. – К.: А.С.К., 1998. – С. 10-26. (Механика композитов: В 12 т. Т. 7).
3. Калоеров С. А., Горянская Е. С., Полухин А. В. Напряженное состояние горного массива с выработкой и разгрузочными щелями // Теорет. и прикладная механика. – 1996. – Вып. 26. – С. 28-35.
4. Управление напряженным состоянием породного массива и устойчивостью горных выработок / Полухин А. В., Калоеров С. А., Грядущий Ю. Б., Горянская Е. С. – Донецк: Юго-Восток, 2002. – 304 с.
5. Калоеров С. А., Вакуленко С. В. Решение циклической задачи для пластинки с отверстиями и трещинами и его приложение в горном деле // Вісн. Донец. ун-ту. Сер. А. – 2003. – Вып. 2. – С. 111-118.