



**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА
ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕЩИНЫ В КРОВЛЕ ВЫРАБОТКИ**

А. А. Красновский

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: visanta@ngs.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрено влияние трещины, образованной в кровле выработки, на напряженно-деформированное состояние породного массива. Выписаны соотношения, определяющие компоненты смещений и напряжений на границе выработки прямоугольной формы, линиях контакта слоев и на линии, содержащей трещину. Приведены примеры численной реализации этих выражений. Выполнен анализ полученных результатов.

Напряжения, смещения, задача, граничные условия, массив пород, трещина, система уравнений, решение

STRESS-STRAIN STATE OF A ROCK MASS WITH A CRACK IN OPENING ROOF

A. A. Krasnovsky

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: visanta@ngs.ru, Krasny prospect 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The influence of a crack formed in the opening roof on stress-strain state of the rock mass is considered. The relationships determining displacement and stress components at the boundary of an opening with rectangular shape, on contact lines of the layers and on the line containing crack are written. The examples of numerical implementation are given. The analysis of the obtained results is carried out.

Stresses, displacements, problem, boundary conditions, rock mass, crack, equation set, solution

Оценка состояния кровли подземных горных выработок была и остается одной из приоритетных задач геоконтроля. Ее решение на практике осуществляется различными методами, при этом применение некоторых из них часто обусловлено высокой оперативностью и возможностью оценки внутреннего строения, свойств и состояния массива пород по измерениям на поверхности. В то же время достоверная геологическая и геомеханическая интерпретация таких измерений, определение строения, трещиноватости массива, оценка устойчивости пород кровли относятся к области решения обратных задач, что представляет собой некоторые трудности.

Устойчивость кровли горных выработок зависит от совокупности горно-технологических и геологических условий, из которых только первые могут быть отнесены к разряду управляемых. Наши знания о них всегда ограничены, хотя именно они во многом определяют способ поддержания и качество прогноза устойчивости кровли. От того, насколько эффективно решаются вопросы управления кровлей в основном звене технологической схемы шахты — очистном забое, зависит безопасность труда и технико-экономические показатели подземной добычи ископаемых.

Для предотвращения опасных явлений необходимо не только иметь информацию о потенциальной возможности разрушения кровли, но и знать, когда оно происходит. Разрушение кровли представляет собой совокупность процессов трещинообразования, поэтому исследование закономерностей процесса разрушения должно быть основано на их рассмотрении. Трещиноватость может иметь и положительное значение при разработке месторождений, в частности, она облег-

чает выемку углей из пластов; рациональная ориентация по отношению к трещинам шпуров при буровзрывных работах способствует созданию большей отбитой массы. Однако чаще всего трещиноватость способствует развитию вредных для горного производства горно-геологических процессов и явлений (сдвигению пород, горным ударам, обвалам и т. п.). Ориентация, частота, тип и вид трещин оказывают существенное влияние на важнейшие физико-механические свойства пород, определяющих устойчивость горных выработок, разрабатываемость месторождения.

Разрушение конструкций и природных объектов сопровождается, как правило, ростом трещин или трещиноподобных дефектов, которые являются наиболее опасными концентраторами напряжений. В свою очередь очевидно, что зарождение и развитие трещин в кровле напрямую зависит от напряженного состояния пород. Поэтому для изучения процесса разрушения кровли необходимо исследование напряженного состояния, изменение которого происходит при подвигании очистного забоя.

При исследовании напряженно-деформированного состояния сред с трещинами широкое применение нашел метод сингулярных интегральных уравнений. Он особенно удобен при решении плоских задач теории упругости для областей, содержащих включения, отверстия и трещины произвольной формы.

В данной работе затронут вопрос определения напряженно-деформированного состояния массива пород, ослабленного прямоугольной выработкой с трещиной, расположенной в кровле [1, 2]. Исследование строится на основе системы сингулярных интегральных уравнений, связывающих все граничные значения компонент напряжений и смещений [3].

Рассмотрим прямоугольную выработку с трещиной в породах кровли (рис. 1). На границе представленной области возможны различные варианты граничных условий в рамках трех основных задач теории упругости. Рассмотрим вариант, когда трещина расположена несимметрично (выделена жирной линией). В этом случае исследуемая область разбивается на соответствующие части, линии контакта которых имеют вид: $y = 0$ ($|x| \geq a$), $y = -2h$ ($|x| \geq a$), $x = a_1$ ($h_1 \leq y \leq H$). Пусть l — линия, содержащая трещину. В данной постановке исследуемая область состоит из пяти частей, каждая из которых является односвязной. Представленное разделение позволяет также при необходимости получить дополнительную информацию о значениях нормальных и касательных компонент напряжений и смещений на линиях контакта соответствующих частей с линией l , содержащей трещину, без нахождения напряженно-деформированного состояния во всей области.

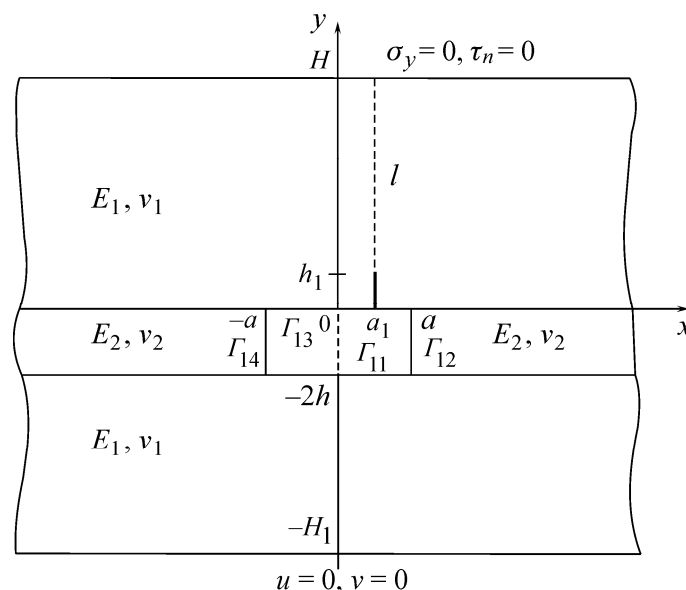


Рис. 1. Расчетная схема выработки с трещиной в кровле

Варьирование положением линии l и самой трещины позволяет рассматривать задачи о расчете напряженно-деформированного состояния как однородных, так и неоднородных массивов пород с трещиной, расположенной в произвольном месте исследуемой области, включая случаи выхода ее на границу или линию контакта.

Система сингулярных интегральных уравнений, связывающая граничные значения компонент напряжений и смещений для произвольной односвязной области, приведена в [3], где

$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$, ν — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга, и содержит функцию $f(t)$:

$$f(x) = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds. \quad (1)$$

Здесь X_n, Y_n — усилия на контуре Γ в направлении осей x и y соответственно; $t \in \Gamma$, i — мнимая единица.

Исследования не вводят априорных предположений о процессе деформирования массива пород, а основываются на непрерывности нормальных и касательных компонент напряжений и смещений на контакте различных сред. Это означает, что на линиях контакта соответствующих частей области и на части линии l ($x = a_1, h_1 \leq y \leq H$) имеют место условия:

$$\sigma_n^+ = \sigma_n^-, \quad \tau_n^+ = \tau_n^-, \quad u^+ = u^-, \quad v^+ = v^-, \quad (2)$$

где верхний индекс означает принадлежность той или иной части массива пород при стремлении к линии l или линиям контакта (рис. 1).

На основании [3] и условий (2) можно записать соотношения, связывающие граничные значения компонент напряжений и смещений на контуре выработки и линиях контакта. Они аналогичны тем, что получены в работах [4–6], и из-за громоздкости записи не приводятся.

В качестве примера выбран случай симметрично расположенной трещины, берега которой свободны от напряжений. Граничные условия на остальной части контура сформулируем в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_{x0} = \text{const}, \quad \tau_n = 0 \quad \text{на границах } -2h \leq y \leq 0, \quad x = a \text{ и } x = -a, \\ \sigma_y = \sigma_{y0} = \text{const}, \quad \tau_n = 0 \quad \text{на границах } -a \leq x \leq a, \quad y = 0 \text{ и } y = -2h, \\ u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при } y = -H_1; \\ \sigma_y = 0, \quad \tau_n = 0 \quad \text{при } y = H. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда, учитывая симметрию задачи, рассмотрим половину исследуемой области (рис. 2), для которой сформулируем граничные условия в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_n = \sigma_{y0}, \quad \tau_n = 0 \quad \text{на } \Gamma_{11} \text{ и } \Gamma_{13}, \\ \sigma_n = \sigma_{x0}, \quad \tau_n = 0 \quad \text{на } \Gamma_{12}, \\ \sigma_n = 0, \quad \tau_n = 0 \quad \text{для } x = 0, \quad 0 \leq y \leq h_1 \text{ и } y = H, \\ u = 0, \quad v = 0 \quad \text{для } x = 0, \quad h_1 \leq y \leq H; \quad x = 0, \quad -H_1 \leq y \leq -2h \text{ и } y = -H_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где σ_n, τ_n — нормальные и касательные напряжения; u, v — горизонтальная и вертикальная компоненты смещений.

Для численной реализации полученных выражений перейдем к безразмерным значениям, отнеся величины, имеющие размерность длины, к характерной мощности слоя пород $2h$, а размерность напряжений — к напряжениям на характерной глубине нетронутого массива γH . Расчеты результатов, представленных в работе, проводились при $\nu = 0.25, E = 10^4$ для случаев:

$$1) a = 0.5, \quad 2) a = 1.0; \quad 3) a = 1.5, \quad (5)$$

для каждого из которых рассматривались варианты с разной длиной трещины.

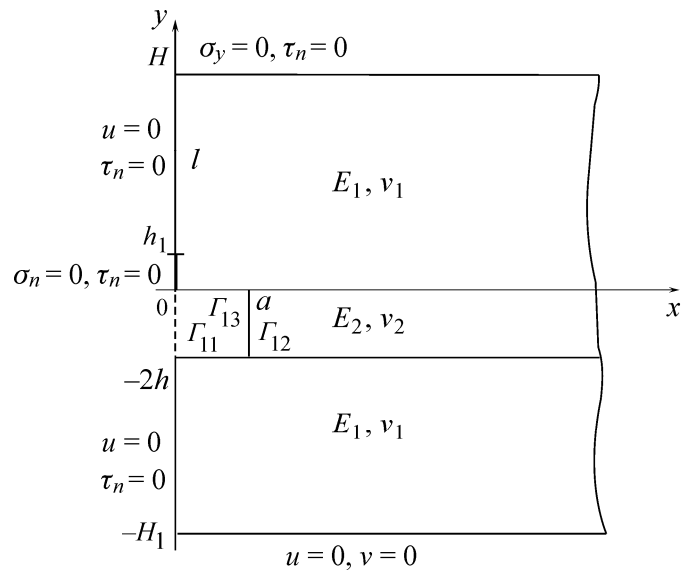


Рис. 2. Расчетная схема половины выработки с симметрично расположенной трещиной в кровле

На рис. 3 показана конфигурация контура рассматриваемой после деформирования выработки и части границ контакта для случая $a = 1$, $h_1 = 0.2$. Отметим, что для наглядности здесь показаны демонстрационные (а не реальные) величины смещений.

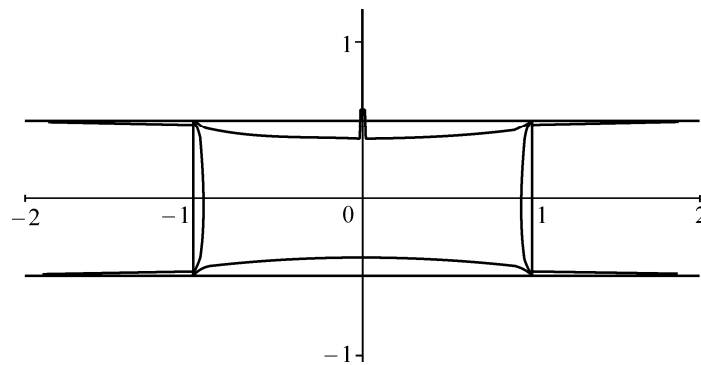


Рис. 3. Деформирование контура выработки, линий контакта и берегов трещины

На рис. 4 представлены результаты расчета вертикальной компоненты смещений $v(x)$ и вещественной части функции $f(t)$ на линии $y = 0$, $x \geq 0$. Кривые 1, 2, 3 соответствуют случаям, описанным в (5), при $h_1 = 0.2$.

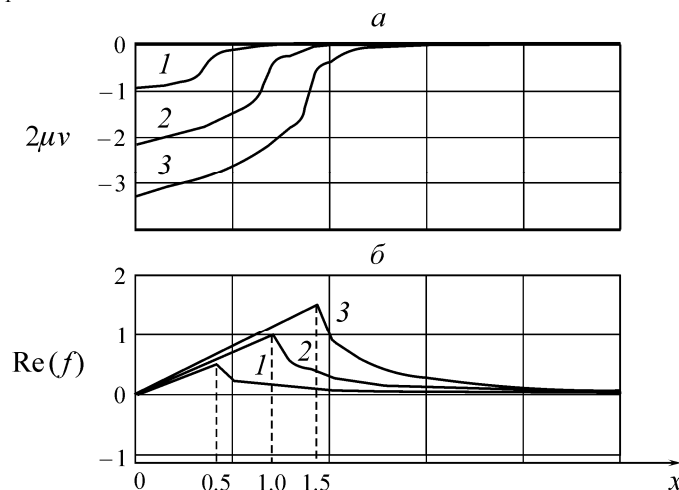


Рис. 4. Граничные значения вертикальных компонент смещений и вещественной части функции $f(x)$ на линии $y = 0$, $x \leq 0$ для случаев: 1 — $a = 0.5$; 2 — $a = 1.0$; 3 — $a = 1.5$ при $h_1 = 0.2$

Полученные результаты показывают сложную структуру напряженно-деформированного состояния и зависимость решения от ряда параметров. Анализ функции (1) позволяет судить о соответствующих компонентах напряжений как на линиях контактов, так и на других участках границы исследуемой области.

Таким образом, полученные соотношения дают необходимую информацию по всем компонентам нормальных и касательных напряжений и смещений на всем контуре выработки, включая дополнительную информацию по этим компонентам на линиях контактов и линии, содержащей трещину, при разделении исследуемой области на составляющие части.

ВЫВОДЫ

На основе системы сингулярных интегральных уравнений получены соотношения, определяющие компоненты смещений и напряжений на границе выработки прямоугольной формы, линиях контакта слоев, берегах трещины и на линии ее продолжения. Полученные результаты позволяют рассматривать задачи о расчете напряженно-деформированного состояния около выработки с трещиной, расположенной в произвольном месте исследуемой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Muskhelishvili N. I.**, Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity, Moscow, Nauka, 1966, 707 pp. (in Russian) [**Мусхелишвили Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966. — 707 с.]
2. **Muskhelishvili N. I.** Singular Integral Equations, Moscow, Nauka, 1968, 511 pp. (in Russian) [**Мусхелишвили Н. И.** Сингулярные интегральные уравнения. — М.: Наука, 1968. — 511 с.]
3. **Mirenkov V. E.** Relation between Stresses and Shifts at the Periphery of a Working, Journal of Mining Science, 1978, vol. 14, no. 3, p. 251–254. [**Миренков В. Е.** Связь граничных значений компонент напряжений и смещений // ФТПРПИ. — 1978. — № 3. — С. 57–63.]
4. **Krasnovsky A. A.** Deformation of Rock Specimens with a Rectangular Opening, Mining Sciences, Fundamental and Applied Mining Science, 2017, vol. 4, no 1, pp. 131–135. (In Russian) [**Красновский А. А.** Деформирование образцов пород с прямоугольным ослаблением // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 4. — № 1. — С. 131–135.]
5. **Krasnovsky A. A.** Specific aspects of rock blocks deformation under compression, Novosibirsk: Siberian State University of Geosystems and Technologies, 2018, vol. 5, pp. 85–90. (in Russian) [**Красновский А. А.** Особенности деформирования блоков пород с дефектами при сжатии // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — Новосибирск: СГУГиТ. — 2018. — Т. 5.— С. 85–90.]
6. **Krasnovsky A. A.** Deformation of rock blocks with a cavity, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2018, vol. 134, 012033. [**Красновский А. А.** О деформировании блоков пород с полостью // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 4. — № 2. — С. 76–79.]