

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ЗАКРЕПЛЕННОЙ ВЫРАБОТКИ, ПРОЙДЕННОЙ В НЕУСТОЙЧИВЫХ ПОРОДАХ

Андрей Анатольевич Красновский

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 189, e-mail: visanta@ngs.ru

Виктор Михайлович Серяков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией, тел. (383)205-30-30, доп. 124, e-mail: vser@misd.ru

Постановка задачи о нахождении напряженно-деформированного состояния крепи и окружающих выработку горных пород при забутовке пустот крепного пространства фенольными смолами использована для установления особенностей его формирования в условиях действия гравитационного и гидростатического исходных полей напряжений. Установлено, что в вертикальных элементах крепи при гравитационном поле возникают максимальные вертикальные сжимающие напряжения, превосходящие в полтора раза их значения для гидростатического поля. Однако с увеличением высоты области в кровле выработки, заполняемой фенольными смолами, максимальные вертикальные напряжения для обоих вариантов становятся сравнимыми друг с другом. В арочных элементах крепи при гидростатическом исходном состоянии массива величины горизонтальных растягивающих напряжений в полтора раза меньше, чем при гравитационном исходном поле.

Ключевые слова: породный массив, выработка, крепь, фенольные смолы, напряженно-деформированное состояние, концентрация напряжений, зоны сжатия и растяжения.

EFFECT OF ORIGINAL STRESS STATE OF THE ROCK MASS ON DISTRIBUTION OF DISPLACEMENTS AND STRESSES IN THE VICINITY OF SUPPORTED MINE WORKING IN UNSTABLE ROCKS

Andrey A. Krasnovsky

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 189, e-mail: visanta@ngs.ru

Viktor M. Seryakov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Professor, Head of Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 124, e-mail: vser@misd.ru

The statement of the problem of finding the stress-strain state of support and rocks surrounding the mine working in case of cushioning with phenol resins is used to determine the peculiarities of its formation under the influence of gravitational and hydrostatic original stress fields. It is found that maximum vertical compressive stresses arise in vertical support units at gravitational field, which exceed by half their values for a hydrostatic field. However, as the height in the mine roof filled with phenol resins increases, maximum vertical stresses for both options become comparable.

In arch support units at hydrostatic original state of the rock mass, the values of horizontal tensile stresses are by half less than at gravitational original field.

Key words: rock mass, mine working, support, phenol resins, stress-strain state, stress concentration, tensile and compressive zones.

Отработка некоторых рудных месторождений характеризуется значительным разрушением приконтурных пород после проходки выработок. Разрушенные породы из кровли выработок заполняют ее сечение, осложняют, а иногда и полностью останавливают ведение подготовительных и очистных работ [1,2]. Особо актуальна проблема поддержания выработок в рабочем состоянии на шахтах рудных месторождений Восточного Казахстана. В ТОО «ВОСТОКЦВЕТМЕТ» разработана и внедрена технология ликвидации обрушений горных выработок с их восстановлением и последующей безопасной проходкой. Обоснована возможность и целесообразность применения полиуретановых и вспенивающихся смол при проходке горных выработок по обрушенным породам на участках с куполообразованием, уточнены параметры технологии крепления, определены рациональные области применения различных технологий [3,4].

Для обоснования параметров технологии ликвидации обрушений горных пород с восстановлением и последующей проходкой выработок в сложных горно-геологических условиях необходима геомеханическая оценка напряженно-деформированного состояния массива, установление особенностей распределения напряжений в крепи и вмещающих породах при применении разработанных технологий и прогноз перераспределения напряжений при изменении горно-технических условий [5,6].

По данным исследований исходного напряженного состояния массива горных пород установлено, что в районах расположения рудных месторождений Восточного Казахстана сформировано близкое к гидростатическому поле напряжений [3]. Например, природное поле напряжений, определенное на глубине около 775 м от дневной поверхности вне зоны влияния опорного давления, показало, что:

- максимальными по величине являются горизонтальные тектонические напряжения σ_1 , действующие вкрест простирания рудных зон, которые превышают вертикальную гравитационную составляющую γH в 1.12 раза;
- вертикальные гравитационные (от веса вышележащих пород) напряжения γH являются промежуточными и составляют $\sigma_2 = \gamma H = 20.9$ МПа;
- горизонтальные напряжения σ_3 , действующие по простиранию рудной зоны, являются минимальными по величине и составляют $0,98 \gamma H$.

При математическом моделировании напряженно-деформированного состояния горных пород в окрестности одиночной выработки соответствующие граничные условия должны быть заданы на внешних границах расчетной области [5].

При проходке выработок в зонах ведения очистных работ исходное напряженное состояние массива изменяется, и расчет полей напряжений и деформа-

ций в горных породах в окрестности выработки должен вестись с учетом этого изменения. В массиве с тектоническим и гидростатическим исходным полем напряжений очистные работы в пределах обрабатываемого этажа оказывают наибольшее влияние на изменение горизонтальных напряжений. В области влияния напряжения снижаются до уровня, соответствующего гравитационному полю напряжений (удовлетворяют гипотезе Динника). Вертикальные же напряжения на расстояниях от границ ведения очистных работ, где ведется проходка подготовительных выработок, незначительно отличаются от γH , где H – расстояние до земной поверхности, γ – удельный вес пород.

Исходя из схемы нагружения крепи и забутовочного массива из фенольных смол, максимальные внешние силовые воздействия на крепь и забутовочный массив будут создаваться в условиях практически мгновенного их возведения за очистным забоем, т. е. при предотвращении разгрузки пород в окрестности забоя от исходных напряжений. В этом случае для оценки максимально возможных напряжений в горных породах и в крепи при применении технологии забутовки закрепного пространства фенольной смолой с креплением выработок рамной металлической крепью, установления характера их перераспределения в зависимости от параметров применяемой технологии достаточно рассмотреть схему плоской деформации с заданием на внешнем контуре расчетной области усилий, соответствующих исходному напряженному состоянию массива горных пород.

На рис. 1 показана схема расчетной области с заданием граничных условий, соответствующих гидростатическому исходному полю напряжений ($\lambda = 1$) и гипотезе Динника ($\lambda = \nu(1 - \nu)$), где ν – коэффициент Пуассона). Здесь 1 – металлическая рамная крепь; 2 – затяжка круглым лесом; 3 – забутовочный материал (фенольная смола); 4 – вмещающие породы; λ – коэффициент бокового распора.

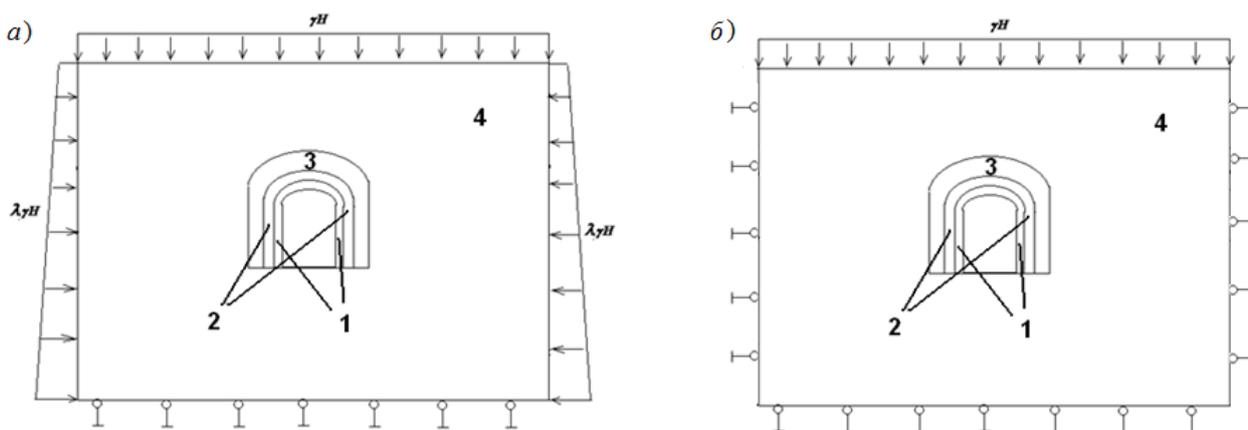


Рис. 1. Граничные условия в задаче расчета напряжено-деформированного состояния породного массива, металлической рамной крепи и забутовочного материала при плотном заполнении закрепного пространства фенольной смолой:

а) гидростатическое исходное поле напряжений; б) исходное поле напряжений, удовлетворяющее гипотезе Динника

Принятые геометрические параметры выработки, металлической крепи, деревянной затяжки и областей, заполняемых фенольными смолами, соответствуют условиям отработки рудных месторождений Восточного Казахстана. Механические параметры деформируемых сред выбраны согласно экспериментальным данным, выполненным на рассматриваемых месторождениях.

Расчеты проведены в предположении упругого деформирования рудного и породного массива, материала крепи и деревянной затяжки. В этом случае для описания их напряженно-деформированного состояния достаточно двух механических характеристик материалов: модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν . Их значения определялись в соответствии с данными физико-механических испытаний всех перечисленных материалов и вмещающих пород [1]. Для крепи было принято: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$; для деревянной затяжки $E = 1 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0.02$; для вмещающих пород $E = 3 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0.2$. Деформирование фенольных смол также описывалось упругой моделью с низким значением модуля Юнга и коэффициентом Пуассона близким к значению 0.5. В этом случае механическое поведение материала близко к поведению несжимаемой среды. Такие механические характеристики для фенольных смол позволяют моделировать основную особенность их деформирования после затвердевания. В расчетах было принято $E = 0.04$ МПа, $\nu = 0.48$. Для расчета исходного гравитационного поля напряжений в массиве задавались значения удельного веса γ всех материалов: для крепи $\gamma = 7.85$ т/м³; для деревянной затяжки $\gamma = 0.6$ т/м³; для фенольной смолы $\gamma = 1.4$ т/м³; для вмещающих пород $\gamma = 3$ т/м³.

Расчеты напряженно-деформированного состояния элементов крепи, вмещающего массива и области, заполненной фенольными смолами, были выполнены с помощью метода конечных элементов [7-9] на основе комплекса программ ANSYS. Область расчета разбивалась на конечные элементы с различными механическими свойствами. На границах между средами с разными механическими свойствами задавались условия жесткого механического контакта.

На рис. 2 приведены изолинии компонент напряжений σ_x и σ_y в крепи и во вмещающих породах при граничных условиях, соответствующих гидростатическому исходному полю напряжений, при высоте слоя смолы в кровле выработки 60 см. Общая картина распределения нормальных напряжений соответствует имеющимся представлениям о характере напряженного состояния пород вокруг выработок. Зоны концентрации горизонтальных напряжений σ_x – почва и кровля выработки, зоны разгрузки – борта выработки. Для вертикальных напряжений σ_y зоны концентрации – борта выработки, зоны разгрузки – кровля и почва выработки. Наличие вокруг выработки областей, заполненных фенольными смолами, вносит существенные изменения в распределение напряжений в крепи. Максимальные значения компонент напряжений по сравнению с вариантом расчета при возведении крепи в выработке, пройденной в сплошном вмещающем массиве, существенно уменьшаются. Сжимающие напряжения в крепи уменьшаются в среднем в 5 раз. Наибольшей нагрузке под-

вержены ее верхняя часть (сжатие) и основание (растяжение). Величины максимальных растягивающих горизонтальных напряжений практически не меняются.

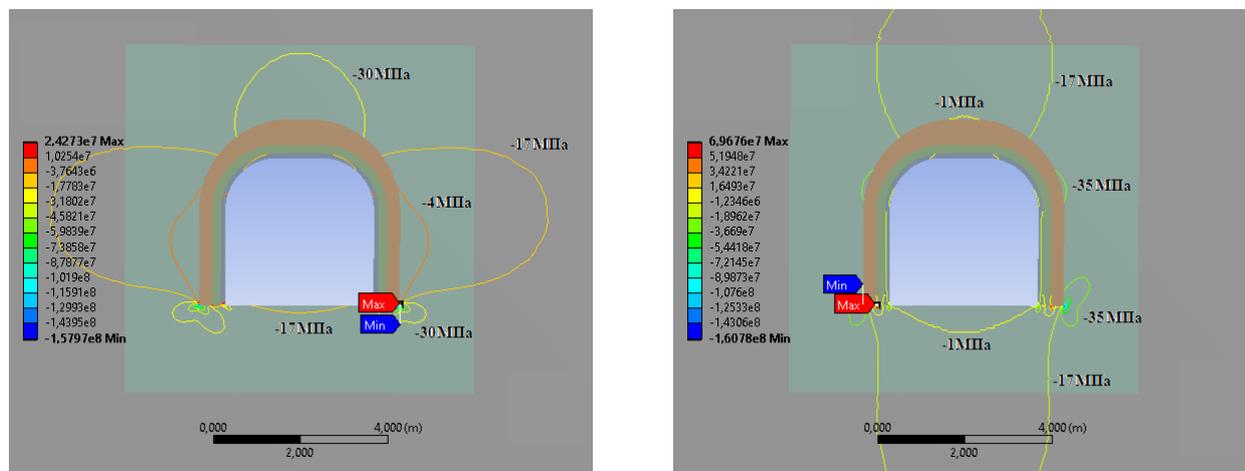


Рис. 2. Распределение горизонтальных и вертикальных напряжений в элементах крепи и во вмещающем массиве при высоте закрепного пространства в кровле 60 см в условиях действия гидростатического поля напряжений

На рис. 3 показаны распределения нормальных компонент тензора напряжений σ_x и σ_y в окрестности закрепленной выработки с высотой слоя фенольных смол в ее кровле 60 см при исходном поле напряжений, удовлетворяющем гипотезе Динника. Во вмещающих породах основные закономерности распределения нормальных напряжений согласуются с их распределением вокруг одиночной выработки, пройденной в массиве с гравитационным исходным полем напряжений.

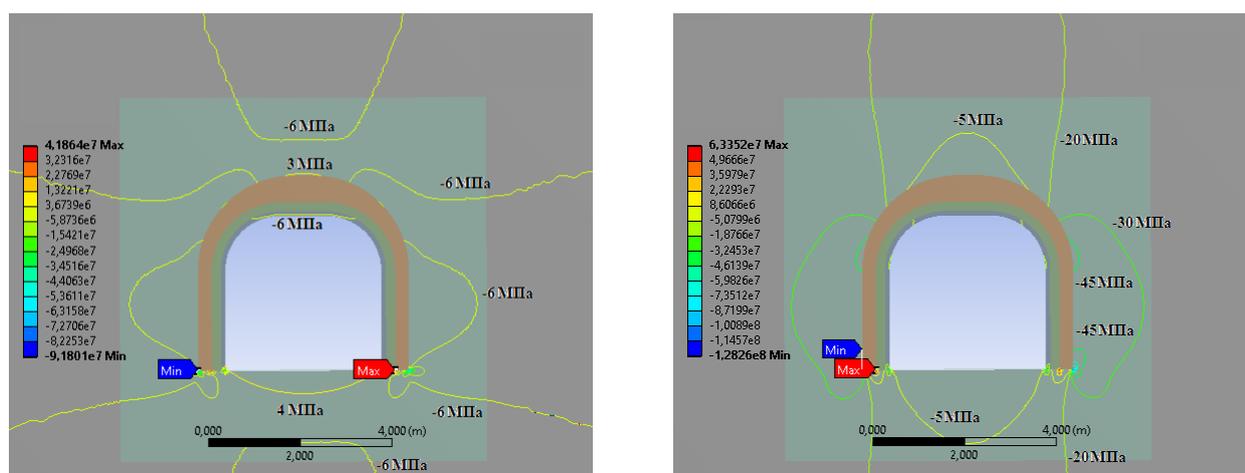


Рис. 3. Распределение горизонтальных и вертикальных напряжений в элементах крепи и во вмещающем массиве при высоте закрепного пространства в кровле 60 см при гипотезе Динника

В крепи максимальные сжимающие напряжения σ_x формируются в ее нижней части в окрестности углов выработки со стороны границы, свободной от напряжений. Максимальные растягивающие напряжения наблюдаются в области, расположенной чуть выше. Близкие к нулю значения отмечаются в вертикальных частях крепи. В верхней части крепи значения напряжений между собой практически не отличаются (локальная однородность). Характер распределения напряжений такой же, что и в варианте гидростатического поля напряжений, но значения напряжений при гравитационном поле большие: превышение сжимающих напряжений незначительно, а растягивающие напряжений больше в 2 раза.

В крепи максимальные сжимающие напряжения σ_y формируются в ее нижней части в окрестности углов выработки со стороны границы крепи, свободной от напряжений. Они примерно в 1,5 раза больше, чем при гидростатическом исходном поле напряжений, но с увеличением высоты области фенольной смолы в кровле напряжения в обоих вариантах становятся близкими по значениям. Максимальные растягивающие напряжения достигаются в верхней части крепи. В вертикальных частях крепи напряжения практически не отличаются по значениям и являются сжимающими, также как в варианте с гидростатикой. Близкие к нулю значения отмечаются в области, расположенной в верхней части крепи, в районе ее закругления. Максимальные растягивающие напряжения формируются в области крепи, расположенной несколько выше точки с максимальными сжимающими напряжениями, причем как со стороны, свободной от напряжений, так и у границы «фенольная крепь-затяжка». По сравнению с вариантом гидростатики, максимальные растягивающие напряжения меньше примерно в 5 раз, но с увеличением высоты закрепного пространства эта разница уменьшается примерно до 3 раз.

Таким образом, оценивая в целом характер распределения напряжений в окрестности закрепленной выработки при заполнении закрепного пространства фенольными смолами, можно отметить, что внешний слой, выполненный из вспенивающегося материала, равномерно распределяет нагрузку по периметру рамной крепи. Это дает возможность использовать разработанную технологию ликвидации обрушений горных пород в различных горно-геологических условиях. Постановка задачи о нахождении напряженно-деформированного состояния крепи и окружающих выработку горных пород при забутовке пустот закрепного пространства фенольными смолами позволила установить особенности его формирования в условиях действия гравитационного и гидростатического исходных полей напряжений. В вертикальных элементах крепи при гравитационном поле возникают максимальные вертикальные сжимающие напряжения, превосходящие в полтора раза их значения для гидростатического поля. В арочных элементах крепи при гидростатическом исходном состоянии массива величины горизонтальных растягивающих напряжений в полтора раза меньше, чем при гравитационном исходном поле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н., Шапошник С.Н. // Опыт внедрения технологии заполнения "куполов" вспенивающимися смолами на шахтах ТОО "Востокцветмет" // Безопасность труда в промышленности, 2017. – № 7. – С. 38 – 43.
2. Ерёменко В.А., Лушников В.Н., Сэнди М.П., Милкин Д.А., Мильшин Е.А. Обоснование и выбор технологии проведения, способов крепления и поддержания горных выработок в неустойчивых горных породах Холбинского рудника // Горный журнал, 2013, № 7. – С. 59–66.
3. Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н., Шокарев Д.А., Шапошник С.Н., Конурич А.И. Совершенствование технологии крепления выработок на Артемьевской шахте ТОО «Востокцветмет» // ФТПРПИ, № 6, 2017. – С. 140 – 148.
4. Шапошник Ю.Н. Выбор составов торкрет-бетонной смеси для шахт ТОО "Востокцветмет" обеспечивающих устойчивость горных выработок // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук: Изд-во ИГД СО РАН, Том 4, № 3. – 2017. – С. 186 – 190.
5. Серяков В.М. Геомеханическая оценка технологий поэтапной отработки и крепления поперечных сечений протяженных выработок // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Т. 5., № 2. – 2018. – С. 124-128.
6. Мартыненко И.И., Мартыненко И.А., Минакова Ж.А. Влияние заполнения закрепного пространства на работу крепи // ГИАБ, 2005. – С.160 – 163.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М., "Мир", 1975. – 539 с.
8. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. М: Недра, 1975. – 185 с.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М: Недра, 1987, 224 с.

© А. А. Красновский, В. М. Серяков, 2020