

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ВЫВАЛОВ ПОРОД ФЕНОЛЬНЫМИ СМОЛАМИ

Андрей Анатольевич Красновский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 633091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383) 205-30-30 доп. 189, e-mail: visanta@ngs.ru

Сформулирована постановка задачи о нахождении напряженно-деформированного состояния крепи и окружающих выработку горных пород при забутовке пустот закрепного пространства фенольными смолами и проведено его математическое моделирование. Установлен характер распределения полей напряжений в крепи и породном массиве и их изменение в зависимости от геометрических размеров области, заполненной фенольными смолами, при различных граничных условиях. Показано, что применение фенольных смол способствует повышению устойчивости крепи, что дает возможность использовать разработанную технологию ликвидации обрушений горных пород в различных горно-геологических условиях. Обсуждаются результаты расчетов.

Ключевые слова: массив горных пород, выработка, крепь, напряженно-деформированное состояние, концентрация напряжений, неустойчивые породы, фенольные смолы

FEATURES OF STRESS-STRAIN STATE OF MINE SUPPORT WHEN FILLING ROCK FALLS WITH PHENOLIC RESINS

Andrey A. Krasnovsky

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, office: + (383) 205-30-30 ext. 189, e-mail: visanta@ngs.ru

The problem of finding the stress-strain state of the mine support and surrounding rocks when filling the voids with phenolic resins has been formulated and its mathematical modeling has been carried out. The pattern of distribution of stress fields in mine support and rock mass and their change depending on the geometric dimensions of the area filled with phenolic resins have been determined under various boundary conditions. It is shown that the use of phenol resins contributes to an increase in mine support stability, which allows using the developed technology for the elimination of rock caving in different mining and geological conditions. The calculation results have been discussed.

Keywords: rock mass, working, mine support, stress-strain state, stress concentration, unstable rocks, phenolic resins

Введение

Для обеспечения высокопроизводительной, безопасной и экономичной выемки полезных ископаемых при возрастающих глубинах разработки месторождений необходимо совершенствовать технологию крепления горных выработок.

В сложных горно-геологических условиях (при неустойчивых породах) при повышенном напряженно-деформированном состоянии применение стандартных методов крепления с установкой тяжелых металлических рамных крепей приводит к их значительному деформированию, за счет обрушения пород кровли образуются «купола» довольно больших объемов, что приводит к аварийному состоянию горных выработок или необходимости проходки обгонных выработок. Часто размеры вывалов в кровле выработок превышают ее высоту, причем в ходе дальнейшей проходки процесс разрушения пород не ослабевает и делает невозможным ведение горных работ [1-4].

В этой связи актуальной практической задачей становится разработка оперативной и качественной технологии ликвидации вывалов. Перспективным направлением, позволяющим успешно решить возникающие вопросы, является технологии быстрого заполнения пустот, образовавшихся вследствие вывалов, вспенивающимися полимерными смолами. Так, для заполнения закрепных пустот и куполов в горных выработках при ведении подготовительных и очистных работ широкое распространение на шахтах Кузбасса получила технология заполнения пустот вспенивающейся смолой «Карбофил». Эффективным способом заполнения куполов является технология с применением фенольной или органоминеральной смолы. Такая технология апробирована в подготовительных выработках на Орловской шахте ТОО «Востокцветмет» [2]. Выполненные работы позволяют утверждать, что заполнение зоны вывалов пород в кровле выработки фенольными смолами обеспечивает их поддержание в рабочем состоянии, останавливает процесс дальнейшего вывалообразования в образовавшихся «куполах» и повышает устойчивость аварийных участков выработок. Установлено, что основными факторами, влияющим на напряженно-деформированное состояние (НДС) массива пород вокруг выработки являются параметры природного поля напряжений, характерные для месторождения и форма поперечного сечения выработки, а увеличение геометрических размеров выработки в процессе ее проходки на 5 – 15% (согласно действующей инструкции допускается отклонения на 10%) не оказывает влияние на НДС массива пород вокруг выработки. В качестве обоснованности выбора форм сечения выработок принят анализ практического опыта применения различных форм поперечного сечения выработок с учетом физико-механических свойств пород, их назначения в различных условиях проявления горного давления.

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].

Постановка задачи

Полное описание процесса деформирования горных пород в окрестности выработок, пройденных в неустойчивых породах с использованием технологии заполнения пустот обрушения вспенивающимися смолами, является сложной задачей.

На рис. 1 представлена схема нагружения металлической рамной крепи при плотном заполнении “купола” обрушения забутовочным материалом (фенольными смолами) [3].

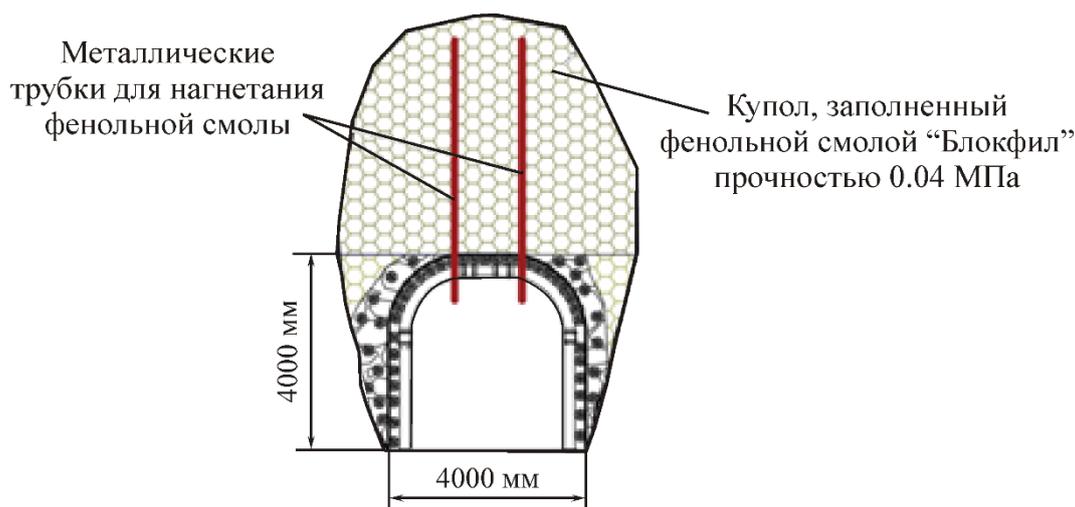


Рис. 1. Схема заполнения “купола” в кровле выработки забутовочным материалом (фенольной смолой “Блокфил” прочностью 0.04 МПа)

В работе рассмотрена наиболее простая ее постановка, позволяющая оценить важные особенности формирования напряженного состояния массива горных пород около выработки и в крепи в условиях гидростатического исходного поля напряжений.

В данном случае 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. Поэтому для оценки максимально возможных напряжений в горных породах и в крепи достаточно рассмотреть схему плоской деформации с заданием на внешнем контуре расчетной области усилий, соответствующих исходному напряженному состоянию массива горных пород.

На рис. 2 показана схема расчетной области с заданием граничных условий, соответствующих гидростатическому исходному полю напряжений ($\lambda = 1$), где 1 – металлическая рамная крепь; 2 – затяжка круглым лесом; 3 – забутовочный материал (фенольная смола); 4 – вмещающие породы; λ – коэффициент бокового распора, H – расстояние до земной поверхности, γ – удельный вес пород.

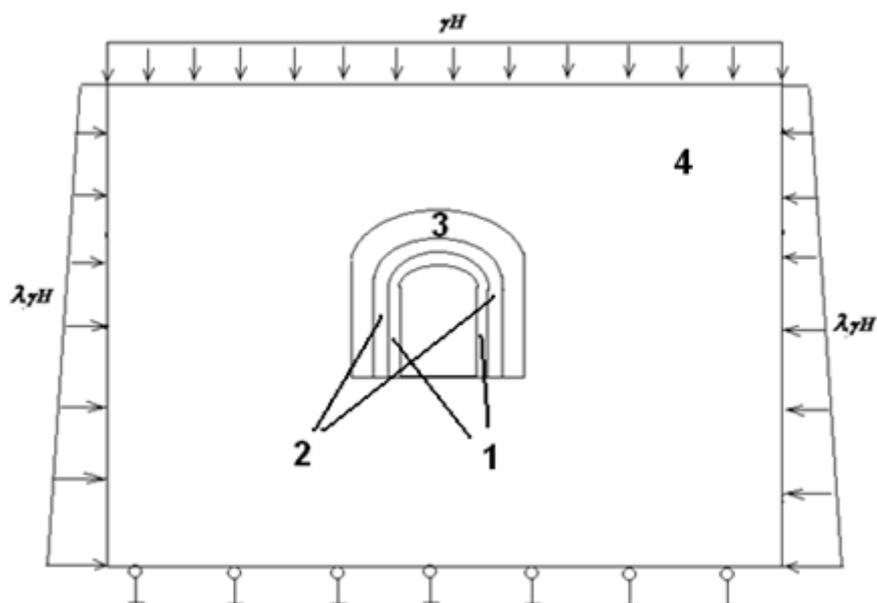


Рис. 2. Граничные условия в задаче расчета напряжено-деформированного состояния породного массива, металлической рамной крепи и забутовочного материала при заполнении закрепного пространства фенольной смолой в условиях гидростатического исходного поля напряжений

В работе, в качестве примера, приняты 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 [2, 3]. Геометрические размеры пустот в кровле и боках выработки при расчетах изменялись.

Методы и материалы

Зависимость между напряжениями и деформациями для всех материалов принята линейной. В этом случае для описания их напряжено-деформированного состояния достаточно двух механических характеристик материалов: модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν , значения которых в расчетах принимались следующими: для крепи $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$; для деревянной затяжки $E = 1 \cdot 10^5$ 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 $E = 0.04 \text{ МПа}$, $\nu = 0.48$. В расчетах задавались следующие значения удельного веса γ всех материалов: для крепи $\gamma = 7.85 \text{ т/м}^3$; для деревянной затяжки $\gamma = 0.6 \text{ т/м}^3$; для фенольной смолы $\gamma = 1.4 \text{ т/м}^3$; для вмещающих пород $\gamma = 3 \text{ т/м}^3$.

Напряженно-деформированное состояние в области расчета определялось методом конечных элементов с применением комплекса программ ANSYS. Область расчета разбивалась на конечные элементы. Явно выделялись границы между материалами с разными механическими свойствами, на которых принимались условия жесткого механического контакта [7, 8].

Для достоверности созданной конечно-элементной модели выполнен ряд тестовых расчетов. Сравнение с известными аналитическими и численными решениями показало хорошее соответствие. Расчеты показали сходимость решений, полученных на сетках с постепенно уменьшающимися размерами элементов.

Результаты

Общая картина распределения нормальных напряжений соответствует имеющимся представлениям о характере напряженного состояния пород вокруг выработок.

На рис. 3 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 3 м.

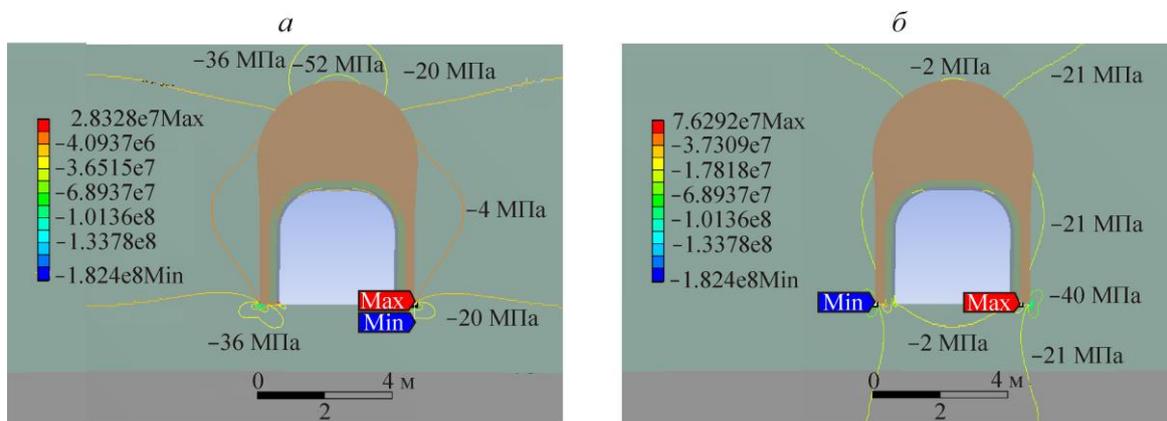


Рис. 3. Распределение горизонтальных и вертикальных напряжений в элементах крепи и во вмещающем массиве при высоте закрепного пространства в кровле 3 м в условиях действия гидростатического поля напряжений

Наличие вокруг выработки областей, заполненных фенольными смолами, приводит к значительным изменениям в распределении напряжений в крепи.

Максимальные значения компонент напряжений в сравнении 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 подвержены ее верхняя часть (сжатие) и основание (растяжение). При этом величины максимальных растягивающих горизонтальных напряжений практически не меняются.

На рис. 4 представлены распределения нормальных компонент тензора напряжений σ_x и σ_y в крепи при высоте слоя фенольных смол в кровле 6 м при гидростатическом исходном поле напряжений.

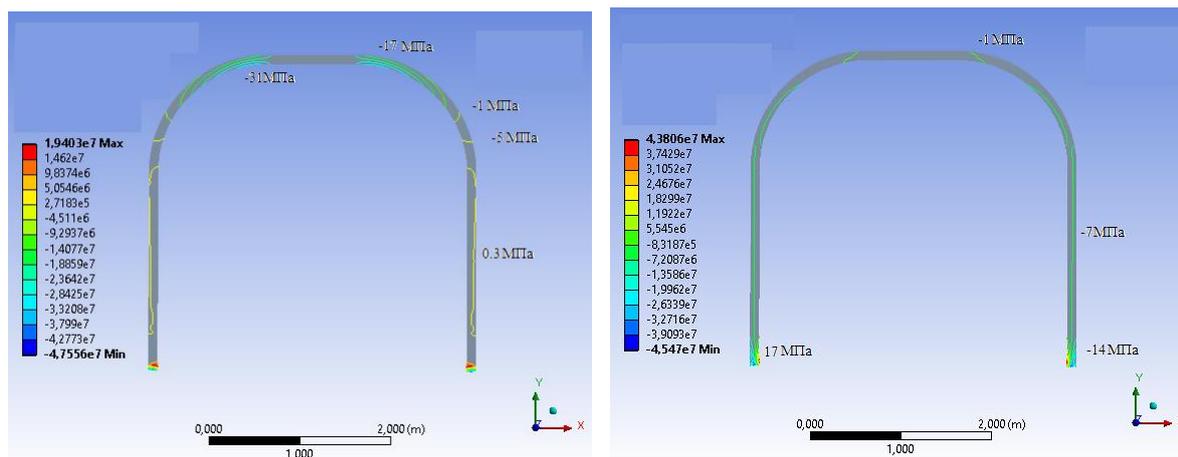


Рис. 4. Распределение горизонтальных и вертикальных напряжений в элементах крепи при высоте закрепного пространства в кровле 6 м при гидростатическом исходном поле напряжений

Анализируя характер распределения напряжений в окрестности закрепленной выработки при заполнении закрепного пространства фенольными смолами, установлено, что слой, выполненный из вспенивающегося материала прочностью 0.04 МПа, равномерно распределяет нагрузку по периметру рамной крепи и способствует повышению ее устойчивости.

Увеличение высоты заполняемого фенольными смолами закрепного пространства в кровле выработки приводит к росту нормальных напряжений в зонах их концентрации во вмещающем массиве. Вертикальные участки крепи находятся в состоянии изгиба, проявляющегося формированием зон растягивающих и нормальных напряжений по толщине крепи, арочные — в состоянии равномерного сжатия. По мере увеличения вертикального размера области, заполненной фенольными смолами, эти напряжения возрастают, причем зависимость практически линейная.

Выводы

Таким образом, сформулированная в работе постановка задачи определения напряженно-деформированного состояния крепи и породного массива вокруг выработки, пройденной в неустойчивых породах, при заполнении образовавшихся пустот фенольными смолами, позволила установить особенности его формирования в условиях действия гидростатического исходного поля напряжений. Выполнено его математическое моделирование. Проведен анализ полученных результатов. Установлен характер распределения полей напряжений в крепи и породном массиве и их изменение в зависимости от геометрических размеров области, заполненной фенольными смолами. Показано, что применение фенольных смол приводит к формированию равномерного давления окружающих пород на арочный участок крепи и способствует повышению ее устойчивости. Это дает возможность использовать разработанную технологию ликвидации обрушений горных пород в различных горно-геологических условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Якоби О. Практика управления горным давлением. // Пер. с нем. – М.: Недра. – 566 с.
2. 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.
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. Ерёмченко 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.
5. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
6. Мартыненко И.И., Мартыненко И.А., Минакова Ж.А. Влияние заполнения закрепного пространства на работу крепи // ГИАБ, 2005. – С.160 – 163.
7. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М: Недра, 1987. – 224 с.
8. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. М: Недра, 1975. – 185 с.

REFERENCES

1. Jacobi O. Praktika upravleniya gornym davleniem. M: Nauka, 1987. – 566 s.
2. Krupnik L.A., Shaposhnik Ju.N., Shaposhnik S.N. // Opyt vnedrenija tehnologii zapolnenija "kupolov" vspenivajushhimisja smolami na shahtah TOO "Vostokcvetmet" // Bezopasnost' truda v promyshlennosti, 2017. – № 7. – S. 38 – 43.
3. Krupnik L.A., Shaposhnik Ju.N., Shokarev D.A., Shaposhnik S.N., Konurin A.I. Sovershenstvovanie tehnologii krepnenija vyrabotok na Artem'evskoj shahte TOO «Vostokcvetmet» // FTPRPI, №6, 2017. – S. 140 – 148.
4. Erjomenko V.A., Lushnikov V.N., Sjendi M.P., Milkin D.A., Mil'shin E.A. Obosnovanie i vybor tehnologii provedenija, sposobov krepnenija i podderzhanija gornyh vyrabotok v neustojchivyh gornyh porodah Holbinskogo rudnika // Gornyj zhurnal, 2013, №7. – S. 59 – 66.
5. Borisov A.A. Mehanika gornyh porod i massivov. - M.: Nedra, 1980. – 360 s.

6. Martynenko I.I., Martynenko I.A., Minakova Zh.A. Vlijanie zapolnenija zakrepnogo prost-
ranstva na rabotu krepki // GIAB, 2005. – S.160 – 163.
7. Fadeev A.B. Metod konechnyh jelementov v geomehanike. M: Nedra, 1987, 224 s.
8. Amusin B.Z., Fadeev A.B. Metod konechnyh jelementov pri reshenii zadach gornoj geome-
haniki. M: Nedra, 1975. – 185 s.

© *A. A. Красновский, 2021*