



**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УЧАСТКОВ КРЕПИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРАХ
ВЫВАЛОВ ПОРОД В КРОВЛЕ И БОРТАХ ВЫРАБОТКИ**

А. А. Красновский, В. М. Серяков

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

Представлены постановка задачи и результаты исследования напряженного состояния крепи и массива вокруг выработки, проводимой в породах с низкими значениями пределов прочности на разрушение. Обсуждены особенности выполнения геомеханических расчетов в неоднородной сплошной среде, имеющей значительную разницу механических свойств и геометрических размеров. Определен характер деформирования крепи при заполнении пустот, образовавшихся при разрушении пород в кровле и бортах выработки, вспенивающимися фенольными смолами.

Породный массив, кровля и борта выработки, крепь, обрушенные породы, фенольные смолы, напряжения, деформации

**STRESS STATE OF SUPPORT SECTIONS AT DIFFERENT SIZES OF ROCK
FALLS IN THE ROOF AND SIDES OF AN EXCAVATION**

A. A. Krasnovsky and V. M. Seryakov

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

The formulation of the problem and results of studying the stress state of the support and rock mass around the excavation in rocks with low values of the fracture strength are presented. The features of performing geomechanical calculations in inhomogeneous continuous medium with significantly different mechanical properties and geometric dimensions are discussed. The nature of support deformation when filling the voids formed during the rock destruction in the roof and sides of the excavation with foaming phenolic resins is determined.

Rock mass, roof and sides of excavation, support, caved rocks, phenolic resins, stresses, strains

Часто подземные подготовительные и очистные горные работы ведутся в породах, имеющих низкие прочностные характеристики. Через непродолжительное время после крепления выработок в их кровле начинается процесс интенсивного разрушения горных пород [1–3]. Этот процесс, но меньшей интенсивности, охватывает и борта выработок. Разрушенные породы оказывают неравномерное механическое воздействие на крепь выработки, приводят к ее значительному деформированию, локальному изгибу и разрушению [4, 5]. В таких условиях для обеспечения надежной работы крепи в первую очередь проводится удаление обрушенных пород из кровли и бортов выработки. Однако образовавшиеся пустоты не препятствуют дальнейшему разрушению пород вокруг выработок. Необходима разработка технических решений, останавливающих или минимизирующих этот процесс. Наибольшее распространение получила технология заполнения образующихся пустот вспенивающимися фенольными смолами [6, 7]. Предложены различные технические решения для создания в кровле и бортах выработки пено-

образного забутовочного массива. Суть всех их состоит в том, что обрушенные пустоты полностью заполняются пенообразным материалом с механическими и прочностными свойствами [8, 9]. Как показывает практика, после применения вспенивающихся фенольных смол разрушение пород вокруг выработок прекращается. Пенообразный материал препятствует негативному воздействию массива на крепь горных выработок. Однако при дальнейшей проходке выработки и заполнении образующихся пустот устойчивость крепи часто нарушается, ее деформирование плохо прогнозируется. Процесс работы крепи в таких условиях нуждается в дополнительном исследовании, которое, прежде всего, состоит в рассмотрении напряженно-деформированного состояния механической системы “крепь – окружающие породы” [10, 11].

Постановка задачи. Для установления наиболее характерных особенностей деформирования крепи и окружающих выработку пород в случае заполнения образовавшихся пустот фенольными смолами использованы предположения плоской деформации. Плоская область моделирования представлена неоднородной сплошной средой, моделирующей материал крепи, породный массив и фенольные смолы (рис. 1). Конфигурация выработки, крепи, образовавшихся и заполненных фенольными смолами пустот считалась неизменной в направлении, перпендикулярном рассматриваемому сечению. Такое приближение предполагает, что технология применения фенольных смол использована на достаточно большом протяжении выработки. Деформирование всех разновидностей сплошных сред предполагалось удовлетворяющим закону Гука, на границах между различными средами выполнялись условия жесткого контакта.

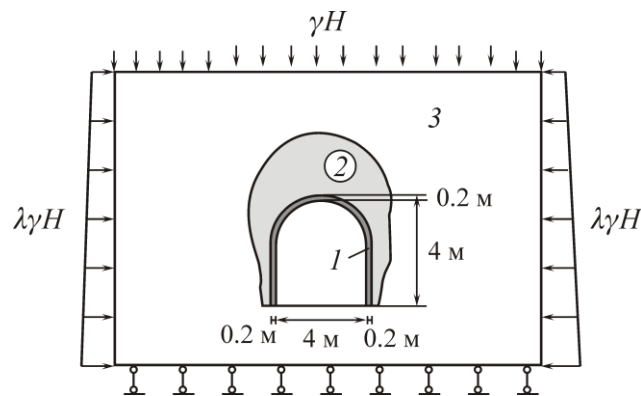


Рис. 1. Расчетная схема задачи: 1 — крепь; 2 — фенольные смолы; 3 — вмещающий массив

Граничные условия задачи определения напряженного состояния расчетной области заданы на основе следующих рассуждений. Последовательная проходка выработки, дальнейшее возведение крепи, последующее заполнение образовавшихся пустот фенольными смолами приводят к тому, что на значительном удалении от забоя выработки деформирование области моделирования будет определяться преимущественно исходными напряжениями, действующими в массиве до начала ведения горных работ. Соответствующие граничные условия и были заданы на контуре расчетной области. В дальнейшем рассмотрен вариант гидростатического исходного напряженного состояния массива: $\sigma_y^0 = \varphi H$, $\sigma_x^0 = \varphi H$, $\tau_{xy}^0 = 0$, где σ_x^0 , σ_y^0 , τ_{xy}^0 — нормальные и касательная компоненты тензора напряжений; φ — объемный вес пород; H — расстояние до дневной поверхности до середины выработки. Ось Ox направлена вдоль линии горизонта, Oy — по вертикали.

Метод решения и тестовые расчеты. Для решения поставленной задачи использован программный комплекс ANSYS. Механические свойства горных пород, принятые в расчетах, следующими: модуль Юнга $E = 3 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.2$. Для материала крепи: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$ [4, 9]. Механическое поведение фенольных смол моделиро-

валось упругой моделью с низким значением модуля Юнга и коэффициентом Пуассона, близким по величине к 0.5. В этом случае характер деформирования материала, заполняющего объем пустот, аналогичен поведению несжимаемой среды. Такие механические характеристики для фенольных смол позволяют учесть основную особенность их деформирования после затвердевания. В расчетах принято: $E = 0.04$ МПа, $\nu = 0.48$.

Выработка имеет сводчатую форму (рис. 1), ее размеры в рассматриваемом сечении 4×4 м, толщина крепи равнялась 0.20 м. Расстояние выработки от дневной поверхности — 750 м. Значения удельного веса сплошных сред γ выбраны следующими, т/м³: для крепи 7.85, для фенольной смолы — 1.4, для вмещающих пород — 3 [4, 9].

Выбранные геометрические и механические параметры задачи соответствуют реальным условиям отработки, но в этом случае для достоверного анализа результатов расчетов необходимы дополнительные исследования. Их необходимость связана со значительным отличием геометрических и механических характеристик крепи и породного массива. Детальное рассмотрение напряженного состояния крепи требует разбивки ее объема на большое количество конечных элементов. Вследствие различия на порядок значений модуля Юнга крепи и породного массива вблизи границ их контакта будут наблюдаться большие градиенты полей напряжений, поэтому размеры конечных элементов разбивки массива и крепи в окрестности линий контакта должны быть, по крайней мере, одинаковы. Незначительная толщина крепи требует достаточно мелкой сетки конечных элементов. Такое же мелкое разбиение должно быть выбрано и для породного массива. Это приводит к резкому увеличению числа решаемых уравнений. Такое условие в программном комплексе ANSYS выполнимо. Однако уменьшение размеров конечных элементов приводит к повышению рассчитываемых напряжений в областях концентрации, в окрестности угловых точек, в зонах контакта сред с различными механическими свойствами. Это следствие того, что расчет происходит с применением теории упругости, дающей бесконечные значения напряжений в зонах концентрации.

В связи с этим проведены тестовые расчеты напряженного состояния исследуемой области с последовательно увеличивающимся количеством элементов разбивки исследуемой области. Установлено, что увеличение количества конечных элементов в расчетной области приводит к быстрому росту напряжений в окрестности угловых точек. Например, при изменении размера сетки от 0.05 до 0.01 м максимальные по модулю напряжения возрастают примерно в 70 раз, однако это дает возможность получить более достоверные результаты по напряжениям в области между углами крепи в ее основании. Такие результаты свидетельствуют о том, что в рассматриваемых задачах для оценки возможных областей разрушения нельзя использовать обычные критерии разрушения — по значениям главных и максимальных касательных напряжений. Необходимо применение интегральных критериев, основанных на расчете коэффициентов интенсивности напряжений. В настоящее время применение такого подхода вызывает большие трудности, так как данные о предельных значениях коэффициентов интенсивности напряжений для большинства материалов отсутствуют. Вместе с тем можно провести анализ различных геомеханических ситуаций вокруг выработки, пройденной в неустойчивых породах, путем сравнения напряженного состояния крепи и породного массива на одной и той же сетке конечных элементов. Для этих целей выбрана достаточно мелкая разбивка области расчета на конечные элементы.

Обсуждение результатов расчетов. Расчеты напряженно-деформированного состояния крепи и породного массива выполнены для трех горнотехнических ситуаций: крепь, возведенная сплошном массиве горных пород; крепь, работающая при наличии области, заполненной фенольными смолами, в кровле выработки; крепь, работающая при заполнении фенольными смолами бортов и кровли выработки.

На рис. 2 приведены эпюры тангенциальных напряжений, возникающих на внутреннем контуре крепи, для этих горнотехнических ситуаций. Все участки крепи, работающей в сплошном приконтурном массиве, находятся в состоянии сжатия. Максимальное сжатие создается в арочной части крепи вблизи ее контакта с вертикальными участками крепи. Участки крепи в точках ее контакта с почвой выработки являются угловыми точками и в них по мере уменьшения размеров конечных элементов происходит резкое увеличение тангенциальных напряжений. В этих элементах можно проводить только качественное сравнение различных вариантов расчетов, причем на одной и той же сетке.

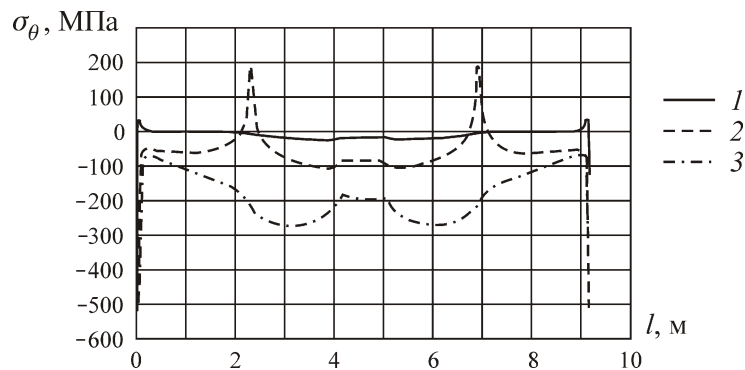


Рис. 2. Эпюры тангенциальных напряжений по длине крепи на ее внутреннем контуре: 1 — фенольные смолы в бортах и кровле выработки; 2 — фенольные смолы в кровле выработки; 3 — крепь, возведенная в сплошном вмещающем массиве (начало отсчета длины крепи l выбрано в точке контакта левого вертикального участка с почвой выработки)

Распределение тангенциальных напряжений при заполнении вывалов, образовавшихся только в кровле выработки, имеет качественное и количественное отличие от варианта возведения крепи в сплошном упругом массиве. В арочной части крепи вблизи ее контакта с вертикальными участками возникают растягивающие напряжения. Их максимальные значения достигают двух третей от максимальных величин сжатия в крепи для варианта сплошного приконтурного массива. В остальных областях крепи уровень сжатия уменьшается.

Для варианта с заполнением вывалов в кровле и почве выработки фенольными смолами практически все участки крепи находятся под действием небольших сжимающих напряжений. Однако обращает на себя внимание формирование в вертикальных участках крепи зон растягивающих напряжений. Отмеченные особенности распределения тангенциальных напряжений в крепи и значения напряжений в ее наиболее характерных точках приведены на рис. 3.

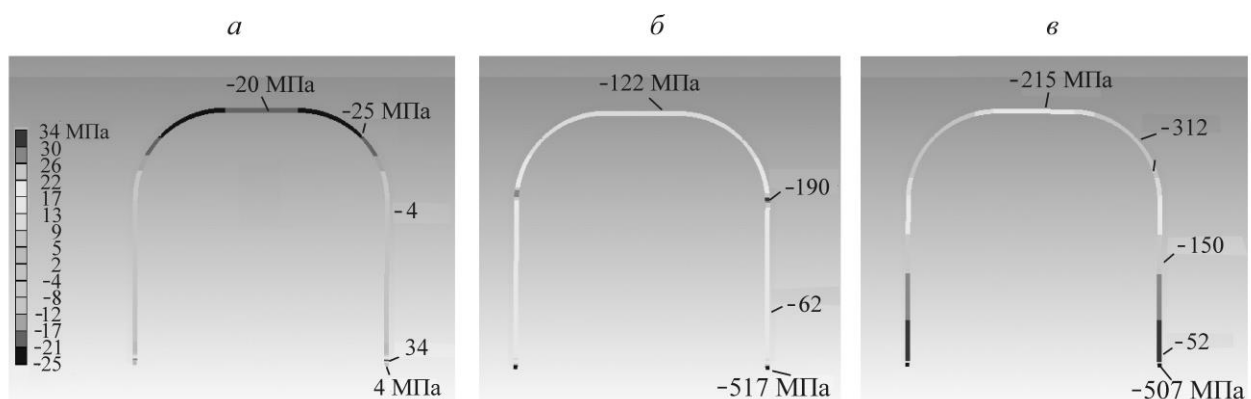


Рис. 3. Распределение тангенциальных напряжений в крепи: а — фенольные смолы в бортах и кровле выработки; б — фенольные смолы в кровле выработки; в — крепь, возведенная в сплошном вмещающем массиве

Представленные результаты расчетов позволяют дать предварительную оценку напряженного состояния крепи и выделить его основные особенности. При заполнении фенольными смолами вывалов пород, образованных только в кровле выработки, в крепи формируются области действия значительных растягивающих напряжений. Выбор материала крепи следует проводить таким образом, чтобы значения растягивающих напряжений не достигали его пределов прочности. При наличии вывалов пород в кровле и почве выработки основное внимание следует обратить на состояние вертикальных участков крепи в районе контакта их с почвой выработки. Образование здесь зон действия растягивающих напряжений может привести к нарушению контакта пород с породным массивом и деформированием крепи в выработанное пространство.

ВЫВОДЫ

Обоснована постановка задачи расчета напряженно-деформированного состояния крепи выработки, пройденной в неустойчивых горных породах, разрушение которых охватывает значительную часть приконтурного массива. При заполнении фенольными смолами вывалов, образовавшихся только в кровле выработки, в арочной части крепи вблизи ее контакта с вертикальными участками возникают растягивающие тангенциальных напряжения. Их значения достигают двух третей от максимальных величин сжатия в крепи для варианта ее работы в сплошном приконтурном массиве. В случае заполнения фенольными смолами вывалов пород в кровле и почве выработки основная часть крепи находится под действием небольших сжимающих напряжений. Вместе с тем в вертикальных участках крепи в районе контакта их с вмещающим массивом формируются зоны растягивающих напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Mayorov A. E. and Khyamalyaynen V. A.** Consolidating fastening of mine workings, Novosibirsk, Publishing house, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 2009. (in Russian) [**Майоров А. Е., Хямяляйнен В. А.** Консолидирующее крепление горных выработок. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — 260 с.]
2. **Till V. V., Bekeev M. M., and Bolikov V. E.** Geomechanical problems of construction of mine shafts at Donskoy GOK, Mining Journal, 2013, no. 5, pp. 22–26. (in Russian) [**Тиль В. В., Бекеев М. М., Боликов В. Е.** Геомеханические проблемы строительства шахтных стволов на Донском ГОКе // Горный журнал. — 2013. — № 5. — С. 22–26.]
3. **Lushnikov V. N., Eremenko V. A., Sandy M. P., and Bukher R.** Fastening of mine workings in conditions of deformable and rock burst hazardous rock massifs, Mining Journal, 2014, no. 4, pp. 37–44. (in Russian) [**Лушников В. Н., Еременко В. А., Сэнди М. П., and Бухер Р.** Крепление горных выработок в условиях деформируемых и удароопасных массивов горных пород // Горный журнал. — 2014. — № 4. — С. 37–44.]
4. **Krupnik L. A., Shaposhnik Yu. N., Shokarev D. A., Shaposhnik S. N., and Konurin A. I.** Improvement of support technology in Artemevsk mine of Vostoksvetmet. Journal Mining Science, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 1096–1102. [**Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шокарев Д. А., Шапошник С. Н., Конурин А. И.** Совершенствование технологии крепления выработок на Артемьевской шахте ТОО “Востокцветмет” // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 140–148.]
5. **Zubkov A. A., Latkin V. V., Neugomonov S. S., and Volkov P. V.** Prospective methods of securing mine workings in underground mines, Mining Information and Analytical Bulletin, 2014, no. S1-1, pp. 106–117. (in Russian) [**Зубков А. А., Латкин В. В., Неугомонов С. С., Волков П. В.** Перспективные способы крепления горных выработок на подземных рудниках // ГИАБ. — 2014. — № S1-1. — С. 106–117.]

6. **Klimchuk I. V. and Malanchenko V. M.** Experience in the use of polymer technologies at mining enterprises in Russia, *Mining*, 2007, no. 4, pp. 22–25. (in Russian) [**Климчук И. В., Маланченко В. М.** Опыт применения полимерных технологий на горнодобывающих предприятиях России // *Горная промышленность*. — 2007. — № 4. — С. 22–25.]
7. **Pir Y. and Pal M. Kh.** Filling the anchorage space with light construction foam mortar, possibilities and limitations, *Gluckauf*, 1988, no. 11, pp. 7–12. (in Russian) [**Пир Ю., Паль М. Х.** Тампонаж закрепного пространства легким строительным пенораствором, возможности и ограничения // *Глюкауф*. — 1988. — № 11. — С. 7–12.]
8. **Krupnik L. A., Shaposhnik Yu. N., and Shaposhnik S. N.** Experience of introducing the technology of filling domes with foaming resins at the mines of Vostoksvetmet LLP, *Industrial safety*, 2017, no. 7, pp. 38–43. (in Russian) [**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.]
9. **Shaposhnik Yu. N., Neverov A. A., Neverov S. A., and Nikolsky A. M.** Evaluation of the impact of accumulated voids on the safety of the completion of the Artemyevskoye field, *Journal of Mining Science*, 2017, no. 3, pp. 108–118. (in Russian) [**Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Неверов С. А., Никольский А. М.** Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 3. — С. 108–118.]
10. **Tretyak A. V.** Selection of the optimal type of support for mine workings based on modeling the stress state of an underground structure, *Mining Journal*, 2013, no. 5, pp. 31–34. (in Russian) [**Третьяк А. В.** Выбор оптимального вида крепления горных выработок на основе моделирования напряженного состояния подземной конструкции // *Горный журнал*. — 2013. — № 5. — С. 31–34.]
11. **Seryakov V. M. and Krasnovsky A. A.** Assessment of the stress-strain state of the rock mass when filling the rock dumps in the roof of the mine with phenolic resins, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 144–148. [**Серяков В. М., Красновский А. А.** Оценка напряженно-деформированного состояния массива при заполнении вывалов пород в кровле выработки фенольными смолами // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 144–148.]