

УДК 622.831

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КРЕПИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ
В НЕУСТОЙЧИВОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

В. М. Серяков, А. А. Красновский

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

Проведена оценка напряженного состояния крепи и пород в окрестности выработки, пройденной в неустойчивых горных породах, при заполнении образующихся пустот в ее кровле вспенивающимися твердеющими смолами. Расчеты выполнены в предположении упругого деформирования материала крепи, горных пород и затвердевших смол. Установлен характер распределения напряжений в крепи при различных размерах высоты купола обрушения пород в кровле выработки и исходного напряженного состояния массива. Определены участки крепи, в которых могут возникать зоны опасной концентрации напряжений.

Породный массив, выработка, крепь, неустойчивые горные породы, концентрация напряжений, напряженно-деформированное состояние, закрепное пространство, фенольные смолы

DOI: 10.15372/FTPRPI20220605

На некоторых рудных и угольных месторождениях проходка подготовительных выработок ведется в неустойчивых породах, которые после обнажения быстро разрушаются [1 – 3]. Удаление разрушенных пород из кровли и бортов выработок приводит к дальнейшему разрушению пород, образуются объемные пустоты, сечение выработок может значительно увеличиться. Применение тяжелых металлических рамных крепей с забутовкой пустот часто не улучшает ситуацию. Процесс разрушения продолжается, нагрузки на крепь увеличиваются, применяемые крепи не полностью обеспечивают поддержание горных выработок в рабочем состоянии. С увеличением глубины отработки процессы разрушения активизируются, купола обрушения в кровле выработок могут превысить ее высоту в 2 – 3 раза. Для предотвращения этих негативных явлений технологическими службами шахт разработаны, опробованы и применяются различные способы [4, 5]. Эффективной является разработанная в ТОО “Востокцветмет” технология ликвидации обрушений горных выработок и последующей их проходки на рудных месторождениях Восточного Казахстана [6]. Ее суть заключается в быстром заполнении образовавшихся пустот вспенивающими материалами, в качестве которых применяются полиуретановые и вспенивающиеся смолы. Благодаря своей жидкой конси-

стенции, вспенивающиеся материалы заполняют все неровности и пустоты закрепного пространства горных выработок. Производственный опыт показывает, что это исключает возможность обрушения пород кровли и динамического нагружения крепи [7].

Для более детального обоснования параметров предлагаемых способов предотвращения обрушений горных пород с восстановлением и дальнейшей проходкой выработок важна оценка напряженно-деформированного состояния массива в районах их проведения, установление характера распределения напряжений в крепи и вмещающих породах, прогноз перераспределения напряжений при изменении горнотехнических условий отработки [8, 9]. Значительную часть информации об особенностях распределения напряжений в зоне проходки выработок в неустойчивых породах может дать математическое моделирование [10–12]. Оно будет использовано в дальнейших исследованиях.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача определения напряженно-деформированного состояния крепи и окружающего выработку массива в условиях отработки неустойчивых горных пород сложна и в полной мере в настоящее время неразрешима. Необходимо введение упрощающих предположений, позволяющих сформулировать такую постановку, решение задачи при которой было бы осуществимо, но вводимые предположения давали бы решение, отражающее основные особенности деформирования массива в рассматриваемых условиях.

Подготовительные и капитальные выработки имеют достаточно большую длину, образовавшиеся в кровле и боках выработки вывалы в большинстве случаев также располагаются на участках большой протяженности. В этих случаях вполне обоснованно рассмотрение задачи в условиях плоской деформации. Последовательность выполнения горных работ при заполнении пустот в кровле и боках выработки следующая. После очередного продвижения забоя при проходке выработки происходит практически мгновенное крепление ее контура. Сразу же в закрепном пространстве начинается разрушение окружающих выработку пород. На последующем этапе работ применяется технология выемки разрушенных пород из закрепного пространства и заполнение образовавшихся пустот вспенивающимися смолами. Смолы затвердевают и образуют жесткий контакт с вмещающими породами и крепью. После этого осуществляется дальнейшее продвижение забоя и последовательность операций повторяется.

Затвердевшая смола представляет собой материал с очень низким модулем упругости ($E \sim 100$ МПа). При нагрузке его поведение соответствует упругому материалу. Еще одна особенность деформирования затвердевших смол — почти неизменный объем при действии сжимающей нагрузки. Эту особенность можно описать введением коэффициента Пуассона, близким к 0.5.

Затвердевшая смола начинает деформироваться вместе с вмещающими породами и крепью в результате дальнейшей проходки выработки. При удалении забоя от рассматриваемого сечения на большое расстояние в крепи, вмещающих породах и в затвердевшей смоле этого сечения формируется окончательное поле напряжений. Данное утверждение справедливо при упругом деформировании всех рассматриваемых сред и отсутствии влияния других очистных и подготовительных работ.

Так как модуль упругости затвердевших смол на несколько порядков меньше модуля упругости горных пород и материала крепи, то их деформирование будет незначительно влиять на поля напряжений в областях проходки и крепления выработок. Приведенный анализ харак-

тера нагружения и деформирования породного массива и крепи в условиях проходки выработок в неустойчивых горных породах позволяет принять следующую постановку задачи расчета их напряженного состояния.

На внешнем контуре расчетной области, представляющем собой сечение массива плоскостью, перпендикулярной оси выработки, задается нагрузка, соответствующая исходному напряженному состоянию горных пород (рис. 1). Контур выработки поддерживается крепью. Вывалы пород в кровле и боках выработки заполнены затвердевшими смолами. Тот факт, что выработка пройдена в неустойчивых породах, моделируется наличием вывалов пород в кровле выработки, заполняемых впоследствии затвердевшими смолами. Породный массив, материал крепи и затвердевшие смолы предполагаются упругими материалами, их свойства приведены в таблице. Ось Ox направлена по горизонтали, Oy — по вертикали. Начало координат расположено на дневной поверхности. На всех внешних границах расчетной области касательная компонента напряжений $\tau_{xy} = 0$. Также равна нулю на нижней границе вертикальная компонента вектора смещений v . Между различными средами, составляющими расчетную область, приняты условия жесткого контакта. В каждой точке расчетной области приложен вес пород.

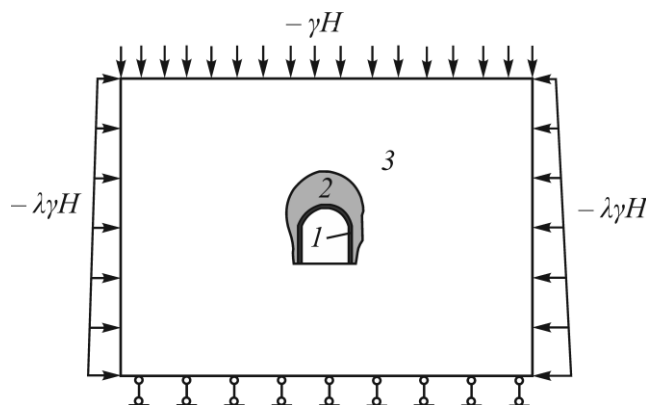


Рис. 1. Постановка задачи расчета напряженного состояния крепи и вмещающего массива при ведении горных работ в неустойчивых породах: 1 — крепь; 2 — фенольные смолы; 3 — вмещающий массив; H — расстояние от дневной поверхности до центра выработки; γ — объемный вес пород

Предложенная постановка дает максимально возможные значения напряжений, которые могут действовать в крепи, так как предполагается мгновенное ее возведение вслед за продвижением забоя. Решение сформулированной задачи аналитическими методами практически неосуществимо, реально его можно получить только с помощью численных методов.

Физико-механические свойства горных пород и материала крепи

Материал	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Объемный вес, т/м ³
Крепь	$2 \cdot 10^5$	0.30	7.85
Породы	$3 \cdot 10^4$	0.20	3.00
Фенольные смолы	0.04	0.48	1.40

Внешние границы расчетной области должны быть удалены от выработки на значительное расстояние с тем, чтобы влияние выработки не сказывалось на исходном напряженном состоянии массива. Как показывают расчеты, удаление вертикальных границ должно превышать деся-

тикратный максимальный размер выработки. Горизонтальные границы удаляются на более значительное расстояние (25 – 20 максимальных размеров выработки). В рассмотренных решениях внешние границы расчетной области удалены от места проходки выработки на расстояния, превышающие 50 максимальных размеров выработки.

ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

Для решения поставленных задач использован программный комплекс ANSYS. Выработка размерами по вертикали и горизонтали 4×4 м имеет форму, изображенную на рис. 1. Крепь поддерживает кровлю и почву выработки, толщина крепи принята 0.2 м. Глубина проходки выработки 750 м. Расчетная область разбивалась на треугольные конечные элементы. Особенности построения сетки, возникающие в рассматриваемой задаче, состоят в следующем. Небольшая по сравнению с размерами выработки толщина крепи требует применения при ее разбивке элементов незначительной площади. Такие же размеры элементов должны быть использованы и в окрестности породного массива, контактирующего с крепью. Требование применения элементов близких размеров позволяет достичь одной и той же точности решения в областях, состоящих из материалов, имеющих разные механические свойства. Указанное обстоятельство нашло подтверждение при решении задач механики горных пород в неоднородных средах с различием их механических свойств в 2 – 3 раза [10, 11]. В рассматриваемой задаче это различие более значительно, модули упругости крепи и горных пород отличаются на порядок. В таких условиях для получения достоверного решения рекомендуется использовать более мелкое разбиение на конечные элементы сплошной среды, имеющей больший модуль упругости.

Все эти требования необходимо выполнять при конечно-элементном разбиении области расчета. Но уменьшение размеров конечных элементов приводит к повышению напряжений в областях их концентрации, в окрестности угловых точек, в зонах контакта сред с различными механическими свойствами. При предельном стремлении размеров элементов к нулю получаются бесконечные напряжения в зонах концентрации. Это следствие применения соотношений теории упругости.

Тестовые расчеты напряженного состояния исследуемой области с последовательно увеличивающимся количеством элементов разбиения крепи показали, что увеличение числа конечных элементов приводит к быстрому росту напряжений в окрестности угловых точек. При изменении максимального размера конечного элемента с 0.05 до 0.01 м максимальные по модулю напряжения возрастают в ~ 70 раз. Это свидетельствует о том, что в рассматриваемых задачах для оценки областей разрушения затруднительно использовать обычные критерии разрушения — значения главных и максимальных касательных напряжений. Необходимо применение интегральных критериев, основанных на расчете коэффициентов интенсивности напряжений. Но их применение вызывает трудности, так как имеющегося экспериментального материала о коэффициентах интенсивности напряжений для большинства сред недостаточно.

Цель настоящей работы — оценка напряженного состояния крепи и вмещающих пород в условиях проходки выработок в неустойчивом массиве. Она предполагает сравнение полей напряжений, сформированных в районе проходки выработки, для различных горнотехнических ситуаций. Это можно сделать путем сравнения напряженного состояния крепи и породного массива на одной и той же сетке конечных элементов, не проводя анализ возможных областей разрушения. Такой подход использован в дальнейшем.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КРЕПИ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТЕ КУПОЛА ОБРУШЕНИЯ В ИСХОДНОМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ

Отработка рудных месторождений, как правило, ведется в условиях действия тектонических напряжений. Отличие от исходного гравитационного поля напряжений при увеличении глубины отработки наблюдается и на угольных месторождениях, горизонтальные напряжения по уровню приближаются к вертикальным. Основные расчеты выполнены для исходного гидростатического поля напряжений:

$$\sigma_y^0 = -\gamma H, \quad \sigma_x^0 = -\gamma H, \quad \tau_{xy}^0 = 0,$$

здесь σ_x^0 , σ_y^0 , τ_{xy}^0 — нормальные и касательная компоненты тензора напряжений; γ — объемный вес пород; H — расстояние до дневной поверхности до середины выработки. Ось Ox направлена вдоль линии горизонта, Oy — по вертикали.

На рис. 2 приведены картины распределения нормальных напряжений σ_x и σ_y в окрестности выработки, пройденной в сплошном массиве горных пород.

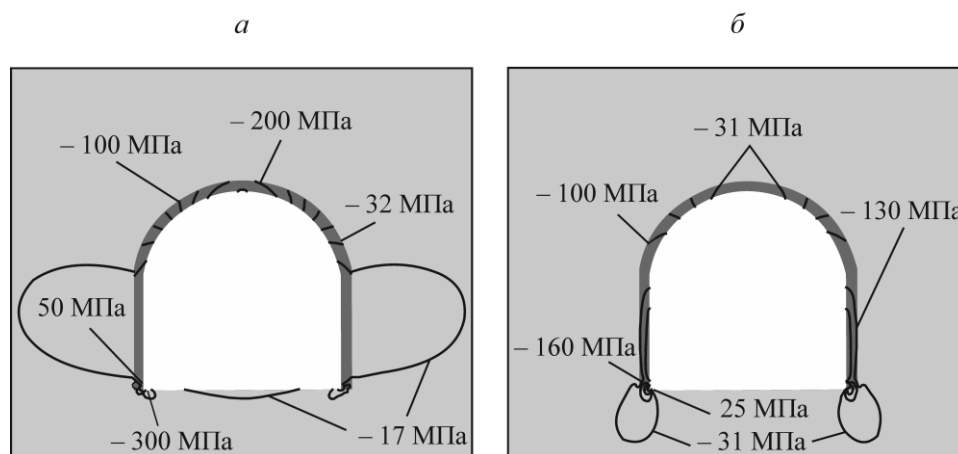


Рис. 2. Изолинии нормальных напряжений σ_x (а) и σ_y (б) в крепи и во вмещающем массиве без купола обрушения пород в кровле выработки при гидростатическом исходном поле напряжений

Характер распределения нормальных напряжений во вмещающих породах во многом повторяет известные особенности их поведения в окрестности незакрепленной выработки. Следует отметить зоны разгрузки от исходных напряжений в боках выработки для компоненты σ_x , в почве и кровле выработки для компоненты σ_y . Области повышенных напряжений для компоненты σ_x — кровля и почва выработки, для компоненты σ_y — почва и бока выработки в районе контакта ее вертикальных и горизонтальной границ. Крепление выработки вносит некоторые изменения в напряжения во вмещающем массиве, но качественная картина их распределения остается неизменной. В крепи формируются сжимающие напряжения. Характер их распределения наиболее детально можно представить по изменению тангенциальных напряжений вдоль длины крепи l (рис. 3а). Начало отсчета ведется от нижней точки левого вертикального участка крепи. Наибольшие сжимающие значения достигаются в арочной части крепи.

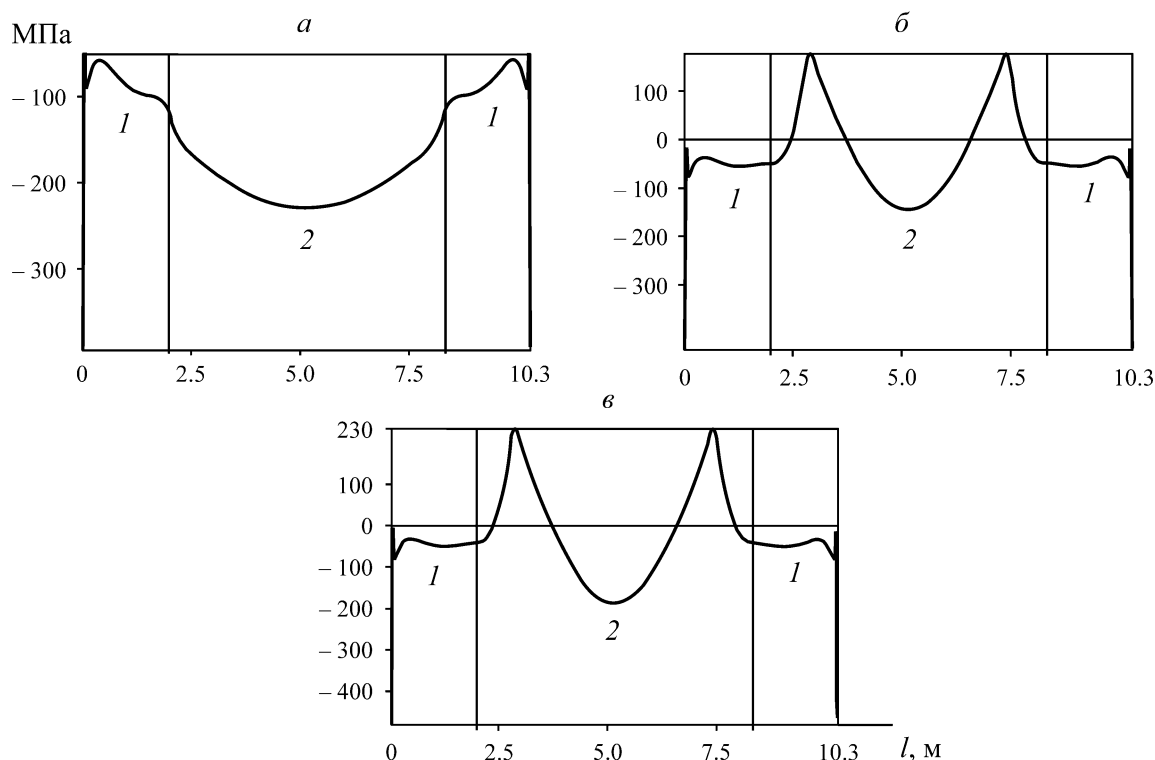


Рис. 3. Эпюры тангенциальных напряжений в крепи, возведенной во вмещающем массиве без купола обрушения пород в кровле выработки (а) и в крепи при высоте купола обрушения в кровле выработки 3 (б) и 6 м (в): 1 — вертикальные участки крепи; 2 — арочный участок

На рис. 4 приведено распределение нормальных напряжений σ_x и σ_y в крепи и во вмещающих породах в районе проведения выработки при высоте купола обрушения пород в кровле выработки 3 м.

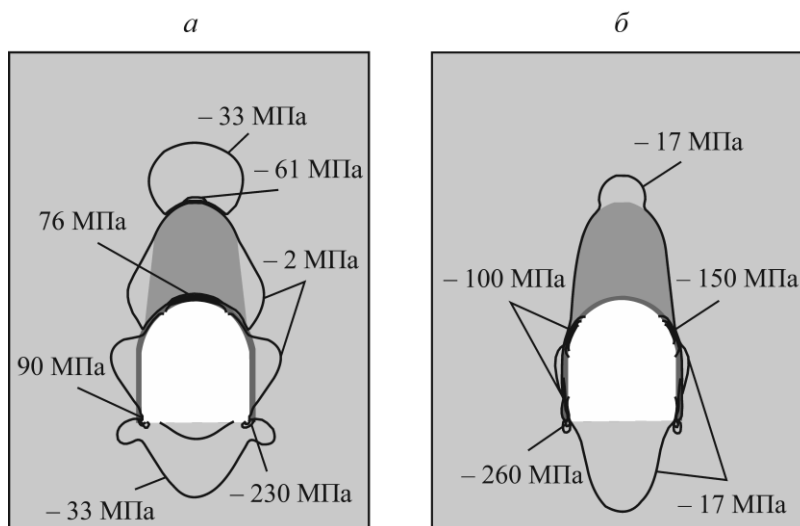


Рис. 4. Нормальные напряжения σ_x (а) и σ_y (б) в крепи и во вмещающем массиве при высоте купола обрушения в кровле выработки 3 м

Ввиду незначительного модуля упругости затвердевших фенольных смол купол обрушения с механической точки зрения можно рассматривать как несжимаемую среду с малым модулем упругости. Это объясняет характер изменения распределения нормальных напряжений во вме-

щающих породах. В кровле купола обрушения и почве выработки происходит увеличение концентрации нормальных напряжений σ_x , в боках выработки и купола обрушения увеличиваются размеры зоны разгрузки.

В крепи, деформирующейся в контакте с вмещающими породами, происходит качественное и количественное изменение тангенциальных напряжений по сравнению со случаем возведения крепи в ненарушенном упругом массиве (рис. 3б). В арочной части крепи вблизи ее контакта с вертикальными участками возникают растягивающие напряжения. Их максимальные значения достигают 2/3 от максимального сжатия в крепи для варианта сплошного приконтурного массива. В остальных областях крепи уровень сжатия уменьшается. При росте высоты купола обрушения наблюдается дальнейшее увеличение отмеченных областей разгрузки вмещающего массива от вертикальных и горизонтальных исходных напряжений, небольшой рост напряжений в зонах их концентрации. Существенных качественных изменений в распределении тангенциальных напряжений в крепи не происходит, лишь несколько увеличиваются напряжения в зонах растяжения, в зонах сжатия уровень напряжений понижается (рис. 3в).

При использовании технологии заполнения объема обрушенных пород в кровле выработки твердеющими смолами в условиях действия исходного гидростатического поля напряжений в областях контакта арочной части крепи с ее вертикальными участками формируются зоны действия растягивающих тангенциальных напряжений. Их значения сопоставимы с пределами прочности материала крепи на растяжение. Образование купола обрушения вызывает в крепи понижение уровня напряжений в зонах сжатия, по сравнению с работой крепи в ненарушенном массиве. Увеличение высоты купола обрушения приводит к незначительному изменению характера распределения напряжений в крепи.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КРЕПИ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТЕ КУПОЛА ОБРУШЕНИЯ В ГРАВИТАЦИОННОМ ИСХОДНОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ

Данный вариант исходного поля напряжений массива горных пород характерен для условий залегания осадочных пород. Проходка выработок в гравитационном поле напряжений может происходить и в районах разгрузки горных пород под влиянием очистных работ. Превышение исходных вертикальных напряжений над горизонтальными существенно меняет картину их распределения в окрестности выработки, пройденной в ненарушенном массиве (рис. 5).

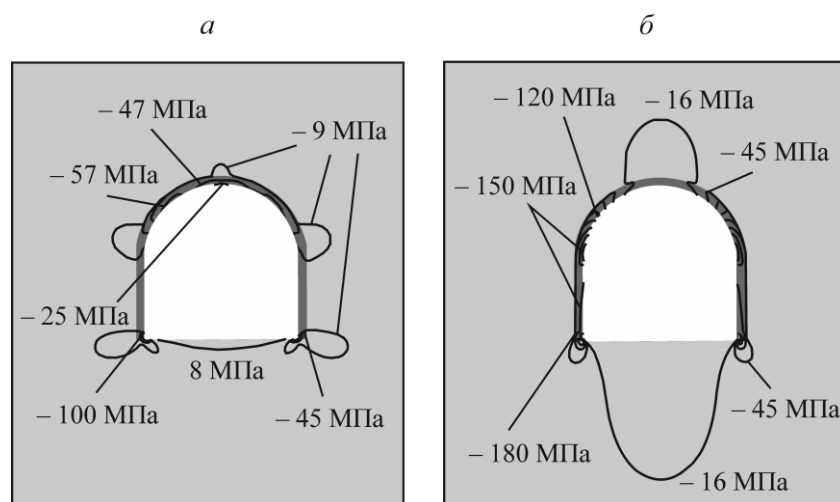


Рис. 5. Нормальные напряжения σ_x (а) и σ_y (б) в крепи и во вмещающем массиве без купола обрушения пород в кровле выработки при гравитационном исходном поле напряжений

Основные отличия по сравнению с вариантом гидростатического поля заключаются в формировании значительных зон разгрузки массива от исходных вертикальных напряжений в кровле и почве выработки. Необходимо отметить области концентрации горизонтальных напряжений в крепи и в породном массиве в районе контакта вертикальных участков крепи с арочным участком и с почвой выработки.

Отмеченные особенности напряженного состояния определяют иную, по сравнению с рис. 2, картину распределения тангенциальных напряжений в крепи (рис. 6а). Арочная часть крепи находится под действием сжимающих напряжений, уменьшающихся по мере приближения к центру свода. Максимальные тангенциальные напряжения формируются в районе контакта вертикальных участков крепи с арочным участком.

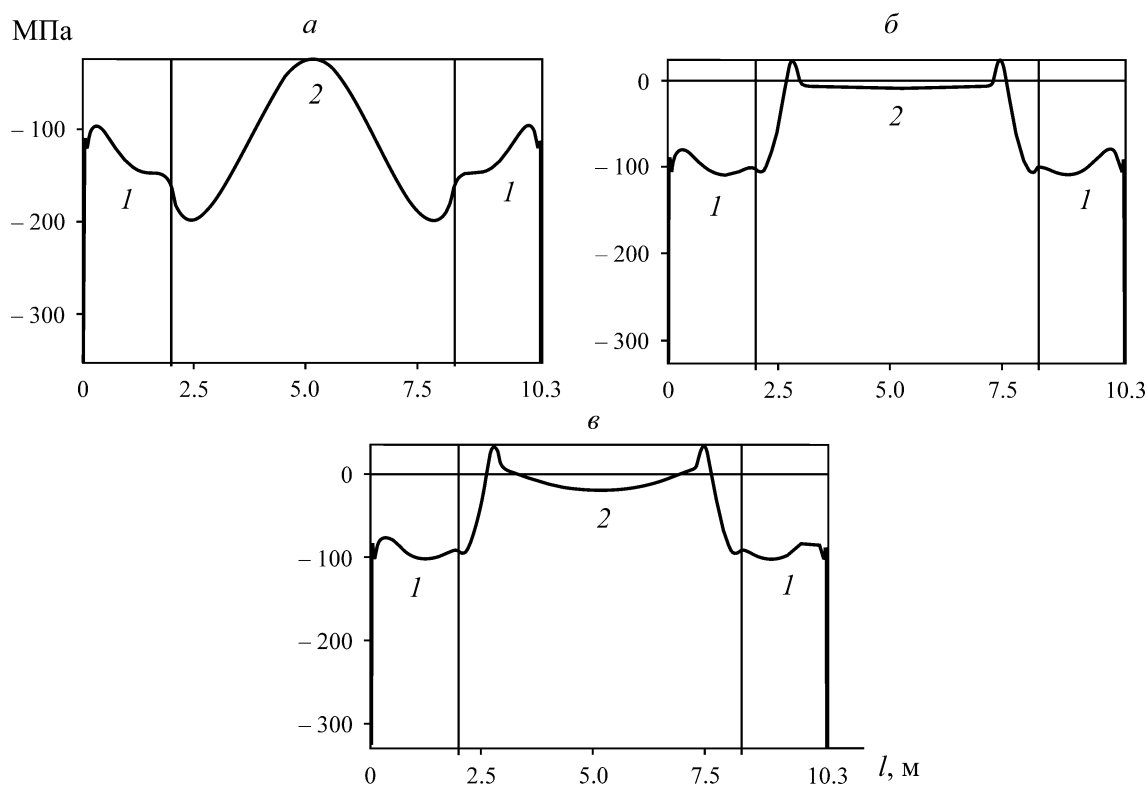


Рис. 6. Эпюры тангенциальных напряжений в крепи, возведенной во вмещающем массиве без купола обрушения пород в кровле выработки при гравитационном исходном поле напряжений (*a*) и в крепи при высоте купола обрушения в кровле выработки 3 (*б*) и 6 м (*в*): 1 — вертикальные участки крепи; 2 — арочный участок

Характер распределения нормальных напряжений во вмещающих породах при образовании купола обрушения, как и ранее, определяется модулем упругости затвердевших фенольных смол. В кровле купола обрушения и почве выработки происходит увеличение концентрации нормальных напряжений σ_x , в боках выработки и купола обрушения увеличиваются размеры зоны разгрузки. Формируются значительные области разгрузки от вертикальных напряжений в кровле купола обрушения и почве выработки. На рис. 7 показано распределение вертикальных и горизонтальных напряжений в окрестности выработки при высоте купола обрушения 3 м.

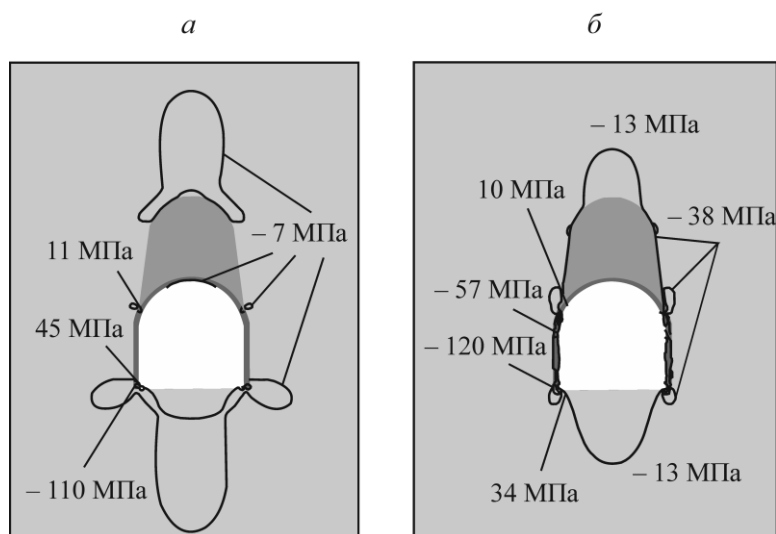


Рис. 7. Нормальные напряжения σ_x (а) и σ_y (б) в крепи и во вмещающем массиве при высоте купола обрушения в кровле выработки 3 м

В крепи, как и при гидростатическом исходном поле напряжений, происходит качественное и количественное изменение напряжений по сравнению со случаем ее возведения в ненарушенном массиве (рис. 6б). В арочной части крепи вблизи ее контакта с вертикальными участками возникают небольшие зоны действия растягивающих напряжений, однако их значения на порядок меньше, чем в случае исходного гидростатического поля напряжений. В вертикальных участках крепи уровень сжатия уменьшается. При увеличении высоты купола обрушения качественных изменений в распределении тангенциальных напряжений в крепи не происходит. В вертикальных участках крепи сохраняется тот же уровень сжимающих напряжений. В отмеченных зонах действия растягивающих напряжений наблюдается их небольшое увеличение (рис. 6в).

Таким образом, при заполнении купола обрушения горных пород в кровле выработки с исходным гравитационным полем напряжений в крепи могут формироваться незначительные по размерам зоны действия растягивающих напряжений со значениями, не достигающими пределов прочности материала крепи. В остальных участках крепи по сравнению с ненарушенным массивом в кровле выработки уровень сжимающих напряжений уменьшается. Увеличение высоты купола обрушения не изменяет характер и значений тангенциальных напряжений в крепи.

ВЫВОДЫ

Обоснована постановка задачи расчета напряженного состояния крепи и вмещающего выработку массива при заполнении купола обрушения пород в кровле выработки фенольными смолами, позволяющая оценить максимально возможные напряжения при изменении высоты купола обрушения и исходного напряженного состояния массива.

Образование куполов обрушения пород в кровле выработки и заполнение их твердеющими смолами в условиях действия исходного поля напряжений, близкого к гидростатическому, приводит к возникновению в арочной части крепи участков, в которых действуют растягивающие тангенциальные напряжения, достигающие пределов прочности материала.

Заполнение куполов обрушения фенольными смолами при гравитационном исходном поле напряжений не вызывает появления в крепи зон действия предельных растягивающих тангенциальных напряжений; уровень их сжатия по сравнению с работой крепи в ненарушенном массиве уменьшается по мере роста высоты купола обрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Майоров А. Е., Хмяляйнен В. А. Консолидирующее крепление горных выработок. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — 260 с.
3. Еременко 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 // Горн. журн. — 2013. — № 7. — С. 59–66.
4. 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.
5. Пир Ю., Паль М. Х. Тампонаж закрепного пространства легким строительным пенораствором, возможности и ограничения // Глюкауф. — 1988. — № 11. — С. 7–12.
6. Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н. Опыт внедрения технологии заполнения “куполов” вспенивающимися смолами на шахтах ТОО “Востокцветмет” // Безопасность труда в пром-сти. — 2017. — № 7. — С. 38–43.
7. Климчук И. В., Маланченко В. М. Опыт применения полимерных технологий на горнодобывающих предприятиях России // Горн. пром-сть. — 2007. — № 4. — С. 22–25.
8. Третьяк А. В. Выбор оптимального вида крепления горных выработок на основе моделирования напряженного состояния подземной конструкции // Горн. журн. — 2013. — № 5. — С. 31–34.
9. Мартыненко И. И., Мартыненко И. А., Минакова Ж. А. Влияние заполнения закрепного пространства на работу крепи // ГИАБ. — 2005. — № 8. — С. 160–163.
10. Амусин Б. З., Фадеев А. Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. — М.: Недра, 1975. — 185 с.
11. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987. — 224 с.
12. 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.

Поступила в редакцию 18/XI 2022

После доработки 23/XI 2022

Принята к публикации 24/XI 2022