

А.М. Кузьменко, д. т. н.
(ГБУЗ «Национальный горный университет»),
В.Ю. Усатый, к.т.н., директор по производству
(ЗАО «Запорожский железорудный комбинат»),
В.В. Усатый

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ ВОКРУГ ВЫСОКИХ ОЧИСТНЫХ КАМЕР ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ

Наведені результати моделювання розподілу напружень навколо високої очисної камери другої черги відпрацювання запасів руди в поперсі при системах розробки с твердуючим закладанням рудних родовищ в складних гірничо-геологічних умовах на великій глибині

DISTRIBUTION OF TENSIONS IN A MINE MASSIF OF AROUND HIGH CHAMBER DURING DEVELOPMENT OF ORE DEPOSIT WITH HARDENING BACKFILL

Results of modeling of normal pressure distribution around the high working chamber of the second turn of working out ore reserves in a floor using the systems of development with a hardening backfill of ore deposits in difficult mine-geological conditions on the big depth are given.

1 Введение

При разработке рудной мощной залежи Южно-Белозерского месторождения на глубине 740-840 м применяется этажно-камерная система с твердеющей закладкой и буровзрывная отбойка руды из поэтажных выработок. Высота очистных камер достигает 100 м при ширине 15-30 м. Днища имеют наклонные плоскости. Камерные запасы руды отрабатываются в две очереди. При изменении технологических параметров камер происходит образование камер третьей очереди. Выработанное пространство камеры заполняют твердеющей закладкой, состоящей из шлаков металлургического передела и доломитов, с частичным добавлением породы и цемента.

2 Рассматриваемый вопрос

Отработка очистных камер нижнего горизонта ведется в две очереди. Камеры второй очереди отрабатываются после того, как закладка в камерах первой очереди наберет необходимую прочность к обнажению и устойчивость к сейсмическому воздействию. Горные работы по добыче руды ведутся в окружении горного массива, который представлен вмещающими породами, рудой и закладочным массивом с разной степенью искусственного метаморфизма.

На устойчивость обнажения закладочного массива, руды и вмещающих пород оказывает влияние форма высоких камер.

Изменение формы очистной камеры может происходить по разным причинам: ухудшением горно-геологических условий разработки месторождения или совершенствованием систем разработки на разных ее этапах. В данном случае рассматривается изменение элементов системы разработки, касающихся кровли и наклонных плоскостей днища камеры. На переходном этапе

от одних к другим параметрам системы разработки неизбежно возникает потребность в рассмотрении вариантов расположения подготовительных выработок для обслуживания горных работ.

3 Постановка задачи

При твердеющей закладке выработанного пространства очистной камеры конфигурация днища камеры становится кровлей. В большинстве случаев кровля представляет собой конгломерат, состоящий из оставленной руды, вмещающих пород и закладочного материала. Модули упругости этих пород имеют разные значения, которые учесть в расчетах практически невозможно. Поэтому по своим физико-механическим характеристикам образованный конгломерат отличается от закладочного и рудного массива.

Задача решалась методом граничных элементов в форме фиктивных нагрузок [1]. Вокруг камер разномодульный массив моделировался двумя подобластями R_1 и R_2 с различными физико-механическими характеристиками. Для этих подобластей рассматривались отдельные краевые задачи, которые потом связывались условиями непрерывности на поверхности контакта в виде равенства касательных и нормальных напряжений.

Рассматривалось напряженное состояние горного массива очистных камер на глубине $H = 840$ м. Модуль упругости E_3 и коэффициент Пуассона ν_3 закладочного массива камер, находящегося с ее боков, принимался равным соответствующим характеристикам руды ($E_3 = E_1$, $\nu_3 = \nu_1$), предел прочности на сжатие $(\sigma_c)_3 = 8$ МПа.

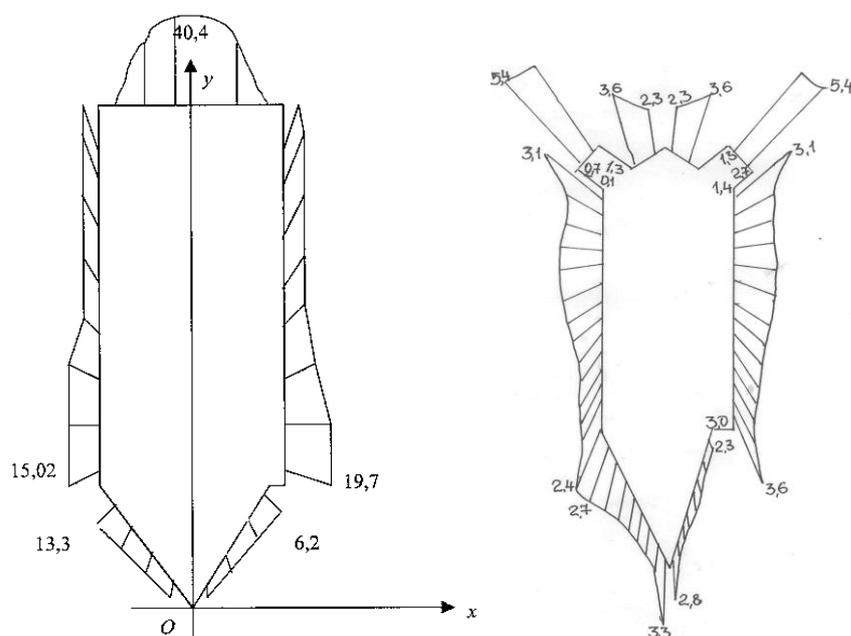
Для оценки устойчивости использовался критерий Кулона-Мора, согласно которому эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв.}}$ на контуре выработки не должны превышать предельно допустимые, определяемые по критерию [1, 2]

$$\max \sigma_{\text{экв.}} = \frac{1}{2\psi} \left\{ \sqrt{(1-\psi)^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 + 4\psi[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\tau_{xy}^2]} - (1-\psi)(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \right\} \leq \sigma_c,$$

где $\psi = \sigma_p / \sigma_c$.

4 Результаты исследования

Выполненные расчеты показали, что для рассматриваемой глубины разработки очистная камера сложной формы находится в упругом состоянии, сохраняя устойчивость при эксплуатации (рис. 1.). Эпюры эквивалентных напряжений имеют наибольшие значения у контура камеры 5,4 МПа в кровле и 3,2 МПа в наклонной части днища. На прямолинейной части вертикальной стенки камеры повышенные напряжения отмечены на выпуклых участках, примыкающих к кровле и днище камеры.



a – плоская потолочина; *б* – зубчатая форма потолочины
 Рис. 1 - Эпюры эквивалентных напряжений в массиве очистных камер второй очереди

При прочности закладочного массива 5 МПа последний имеет запас прочности равен 2, что достаточно для устойчивости закладки к обнажению. Наибольшая концентрация эквивалентных напряжений наблюдается в кровле на конечных ее участках ($k_{\sigma} = 0,71$). По вертикали и в глубину закладочного массива напряжения быстро затухают. На расстоянии 5 м от контура коэффициент k_{σ} уменьшается до 0,43. К центру кровли k_{σ} снижается до 0,33. В нижней части боков камеры концентрация напряжений на контуре не превышает 0,51, а в днище – 0,47. Рассматривая распределение эквивалентных напряжений вокруг камеры можно констатировать, что участки кровли, выходящие за бока камеры, имеют в 2 раза напряжения больше чем в центральной части кровли и в 1,5 раза, чем у днища. Концентрация напряжений отмечается на выпуклостях камеры в сторону массива и очистного пространства, а также при переходе боков камеры к днищу и на острие днища камеры. Их значения одного порядка и составляют 2,2-3,2 МПа.

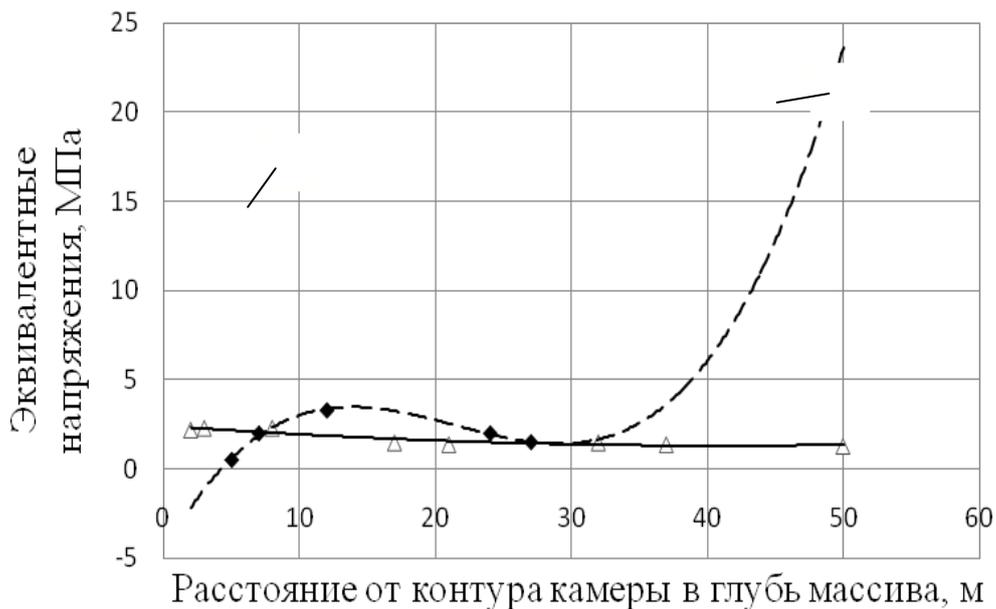
Таким образом, установлено количественное отношение эквивалентных напряжений на контуре сложной формы высокой очистной камеры с учетом направления выпуклости в массив или на выработанное пространство. Наибольшая концентрация камеры эквивалентных напряжений (0,71) наблюдалась при выпуклости контура в массив, увеличиваясь от обнаженной площади с последующим монотонным затуханием. При выпуклости контура в сторону выработанного пространства, напряжения концентрируются у боков камеры (рис. 2).



1 - в выработанное пространство; 2 - в массив

Рис. 2 - Зависимости изменения эквивалентных напряжений в массиве на выпуклостях очистной камеры

На выпуклости контура очистной камеры эквивалентные напряжения изменяются по полиномиальной зависимости в глубину массива, имея показатели в 2 раза больше в боках кровли и в 1,5 раза, чем в днище (рис. 3).



1- при выпуклости контура в выработанное пространство; 2 - при выпуклости контура в массиве
 Рис. 3 - Зависимости изменения эквивалентных напряжений в массиве наклонных плоскостей днища камеры

Взаимосвязь между эквивалентными нормальными напряжениями и их распространение в глубину массива выражается полиномиальной зависимостью вида $\sigma_{\text{экр.}} = -5\text{E-}06b^4 + 0,0007b^3 - 0,031b^2 + 0,513b - 0,19$ при ($R^2=0,98$) при выпуклости контура в камеру и закладочный массив $\sigma_{\text{экр.}} = 1\text{E-}05b^4 - 0,001b^3 + 0,023b^2 - 0,16b + 2,34$ при $R^2=0,95$.

Взаимосвязь между эквивалентными нормальными напряжениями и их распространение в глубину массива в днище камеры выражается полиномиальной зависимостью вида $\sigma = 0,0007b^2 - 0,055b + 2,42$ при ($R^2=0,87$) со стороны рудного массива и $\sigma = 0,0012b^3 - 0,074b^2 + 1,40b - 4,71$ при ($R^2=0,99$) со стороны закладочного массива.

Несмотря на неравномерность распределения эквивалентных напряжений вокруг очистной камеры, для рассматриваемой формы днища, обусловленной технологическими особенностями добычи руды, породный массив нижележащего этажа находится в упругом состоянии, что является благоприятным для его последующей отработки.

Распределение эквивалентных напряжений в кровле камеры имеет особенность, которая выражается в характере формирования напряжений, обусловленной сложной формой.

Из изложенного можно сделать вывод, что в пределах одного горизонта существенное влияние на распределение напряжений вокруг очистной камеры оказывает ее конфигурация, а не глубина ведения горных работ. Днище камеры находится глубже на 100 м за потолочину, а коэффициент концентрации эквивалентных напряжений в 1,5 раза меньше.

Выводы

Изменение кривизны контура является концентратором напряжений, что явно выражено в рассматриваемом сечении камеры. Парадоксально, но у днища камеры коэффициент концентрации эквивалентных напряжений имеет небольшое значение, несмотря на весьма изрезанный контур.

Это позволяет прогнозировать устойчивость сложного контура высоких очистных камер, находящихся в окружении закладочного массива, и формулировать требования к прочности закладочного массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. - М.: Мир, 1987. - 328 с.
2. Парчевский Л.Я., Шашенко А.Н. О величине внутреннего трения в задачах предельного состояния. - В кн. : Горное давление в капитальных и подготовительных выработках. - Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1981, - С. 32-35.