УДК 622.271

С.П.РЕШЕТНЯК, *д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, inpt@mail.ru*
Ю.В.ФЕДОТОВА, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, fjulia@mail.ru*
С.Н.САВЧЕНКО, *д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, root@goi.kolasc.net.ru*
Горный институт Кольского научного центра РАН

S.P.RESHETNYAK, *Dr. in eng. sc., leading research assistant, inpt@mail.ru*
J.V.FEDOTOVA, *PhD in eng. sc., senior research assistant, fjulia@mail.ru*
S.N.SAVCHENKO, *Dr. in eng. sc., leading research assistant, root@goi.kolasc.net.ru*
Mining Institute of the Kola Science Centre, RAS

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМЫ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Способы проектирования конструкции и параметров карьерных бортов в предельном положении имеют принципиальные отличия в случае разработки месторождений, расположенных на относительно небольших глубинах в приповерхностной зоне, и в случае отработки месторождений, расположенных на значительной глубине, в массивах прочных скальных пород, зачастую в условиях действия высоких напряжений тектонической природы. Обеспечение устойчивости карьерных бортов в подобных условиях должно базироваться на основе учета реального напряженно-деформированного состояния вмещающего массива горных пород. Для высоких бортов, формируемых в скальных породах, снижение концентрации напряжений в придонных зонах карьера достигается выполаживанием бортов с приданием им округлой формы вкрест и по простиранию залежи.

***Ключевые слова*:** глубокий карьер, проектные борта, напряженно-деформированное состояние, концентрация напряжений, скругленная форма бортов.

DEEP OPEN PIT WALLS DESIGN USING ROCK MASS STRESS-STRAINED STATE

One of the main deep open pit mining problems is the wall stability for a long time. It is obvious that the basic area of stress concentration in deep pits is the lower edges of pit walls. We have been studying the possibility of reducing stress concentrations like these by means of the alteration of the open pit bottom part configuration. To do this, there was considered the shape with a smooth passage from walls to the bottom of the pit (by widening the berms in the lower part) instead of trapezoid shape. Calculations were carried out for deep open pits with a flat and rounded bottom across and along the strike of the ore body.

***Key words*:** deep open pit, final pit walls, stress-strained state, stress concentration, and rounded bottom.

При проектировании глубоких карьеров помимо традиционно учитываемых факторов необходимо оценивать воздействие на массив горных пород как гравитационных, так и возможных тектонических полей напряжений. При размещении вблизи карьера отвалов вскрышных пород общим весом в несколько миллиардов тонн и хвостохранилищ – в несколько сотен миллионов тонн, их влияние также должно учитываться при оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород, вмещающего эксплуатируемое месторождение.

Принимая во внимание особенную ответственность таких масштабных инженерных сооружений, в проекты всех карьеров

глубиной более 500 м, по нашему мнению, должны быть включены инструментальные системы контроля состояния прилегающего массива пород, бортов и уступов в предельном положении.

Очевидно, что основным местом концентрации напряжений в глубоких карьерах являются нижние бровки бортов (периметр дна). Нами предложены пути снижения подобных концентраций напряжений за счет изменений конфигурации придонной части карьера. Для этого вместо трапециевидной формы карьера в вертикальном сечении рассматривалась форма с плавными переходами от бортов к дну карьера за счет расширения предохранительных и транспортных берм в его нижней части.

При этом учитывалось, что на напряженное состояние массива горных пород, как в естественных условиях, так и в условиях техногенного воздействия, существенное влияние оказывают следующие три основных фактора:

- структурные и прочностные свойства массива горных пород, включающие в себя блочное и геологическое строение, упругие и прочностные характеристики;
- геометрические параметры – размеры и форма блоков, разломных зон; параметры залегания; рельеф, форма выработок и их взаимное расположение и т.д.;
- внешнее силовое воздействие как естественное (гравитационные и тектонические поля), так и техногенное (разгрузка – взрывные работы, пригрузка – образование отвалов и проч.).

Имея в виду эти факторы, был выполнен анализ напряженного состояния пород в окрестности карьерной выемки. На первом этапе исследования массив пород условно был принят однородным, т.е. влияние первого фактора из анализа пока исключено.

Расчеты проводились для карьеров глубиной 700 и 1000 м с плоским и скругленным дном вкрест и по простиранию залежи при горизонтальной дневной поверхности.

В качестве силовых полей рассмотрены следующие варианты:

1. Действие только гравитационных сил, т.е. $\sigma_y = \sigma_x$, $\sigma_y = \gamma y$, $\sigma_x = \lambda\gamma y$, где $\gamma = 3{,}3$ т/м^3 – объемный вес пород; y – расстояние по глубине от дневной поверхности; $\lambda = \nu / (1-\nu)$ – боковой отпор пород; $\nu = 0{,}25$ – коэффициент Пуассона.

2. Совместное действие гравитационных и горизонтальных тектонических напряжений $T_x = -20$ МПа.

3. Совместное действие гравитационных и тектонических сил с распределенной пригрузкой вблизи одного из бортов карьера, имитирующей образование отвала.

Исследования выполнялись методом граничных элементов в двухмерной постановке задачи.

На рис.1 показано распределение горизонтальных σ_x (слева от оси симметрии карьера) и вертикальных σ_y (справа) напряжений при глубине карьера 700 м вкрест простирания рудного тела с плоским (рис.1) и скругленным (рис. 2) дном в условиях действия только гравитационных сил.

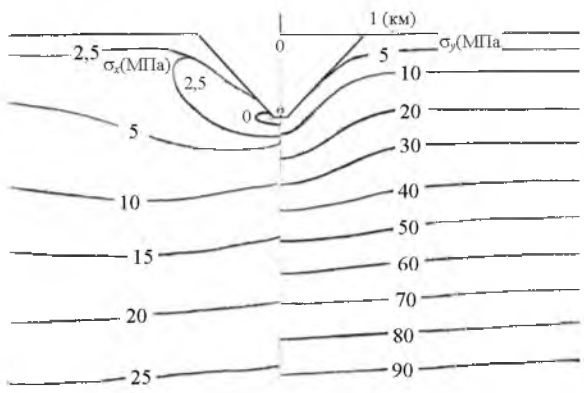


Рис.1. Распределение напряжений вкрест простирания в массиве при традиционной форме дна при действии гравитационных сил (H = 700 м)

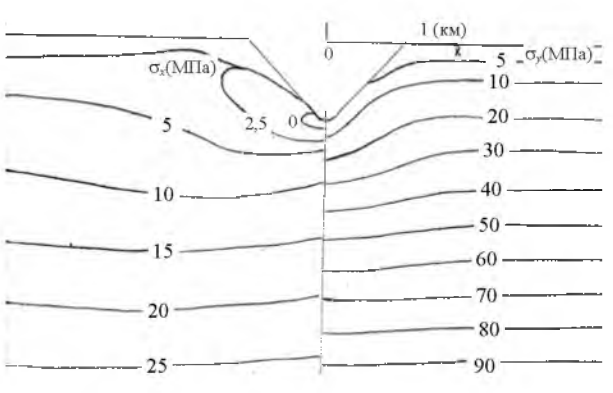


Рис.2. Распределение напряжений вкрест простирания в массиве при скругленной форме дна при действии гравитационных сил (H = 700 м)

Сравнительный анализ этих рисунков свидетельствует о том, что скругление дна карьера не оказывает существенного влияния на характер распределения и величины напряжений. При этом горизонтальные напряжения в окрестности дна карьера близки к нулю, в борту ни не превышают 2,5 МПа, и с глубиной изолинии горизонтальных напряжений быстро выполаживаются, так что на глубине, равной примерно $2h$ от дневной поверхности (h – глубина карьера) и далее, их распределение соответствует закономерности $\sigma_x = \lambda\gamma y$. Изолинии вертикальных напряжений вблизи борта карьера располагаются почти параллельно его контуру, постепенно выполаживаясь с глубиной. На глубине $y > 2h$ напряжения $\sigma_y = \gamma y$.

Таким образом, влияние карьерной выемки в глубину массива распространяется не более чем на 1-1,5 характерных размера карьера.

Такая же закономерность в характере распределения горизонтальных и вертикальных напряжений наблюдается и в случае 1000-метрового карьера (рис.3). Необходимо отметить то обстоятельство, что в непосредственной близости к дну карьера (на его поверхности) горизонтальные напряжения σ_x – растягивающие, что способствует возникновению вертикальных трещин (или раскрытию существующих). Величина растягивающих напряжений зависит от глубины карьера и радиуса кривизны дна. При скруглении дна они по абсолютной величине уменьшаются (8 МПа) по сравнению с плоским дном (13 МПа) для 700-метрового карьера.

Распределение напряжений в окрестности 1000-метрового карьера по простиранию рудного тела при действии гравитационных сил (рис. 4) характеризуется тем, что в окрестности дна карьера более четко определяется область растягивающих горизонтальных σ_x за счет большей протяженности дна.

На рис.4 изолинии растягивающих напряжений изображены пунктирными линиями. На глубине 200 м от дна карьера они становятся равными нулю и глубже переходят в область сжимающих. В массиве, при-

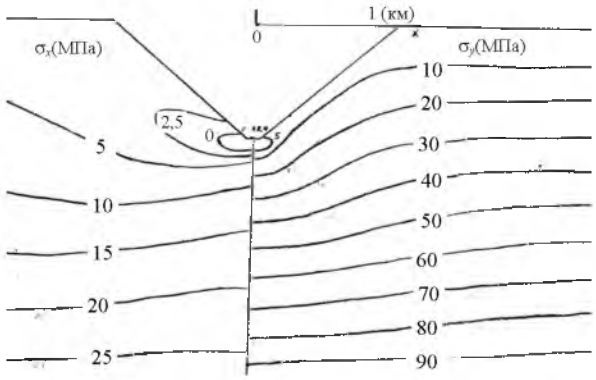


Рис.3. Распределение напряжений вкрест простирания в массиве при традиционной форме дна при действии гравитационных сил (H = 1000 м)

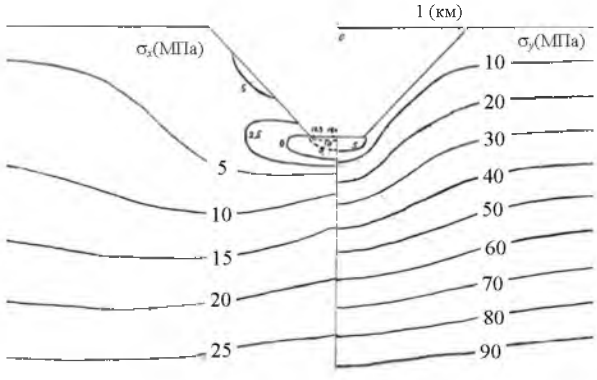


Рис. 4. Распределение напряжений по простиранию в массиве при традиционной форме дна при действии гравитационных сил (H = 1000 м)

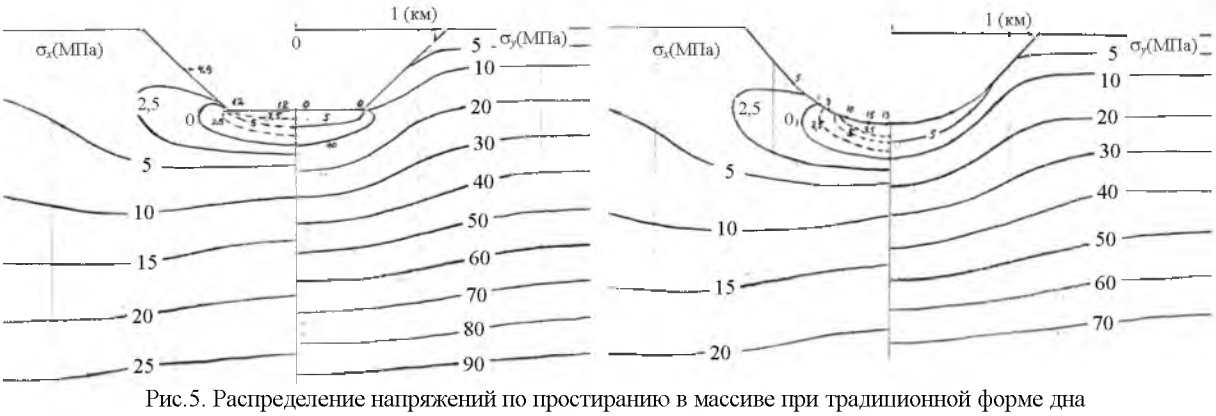


Рис.5. Распределение напряжений по простиранию в массиве при традиционной форме дна при действии гравитационных сил (H = 700 м)

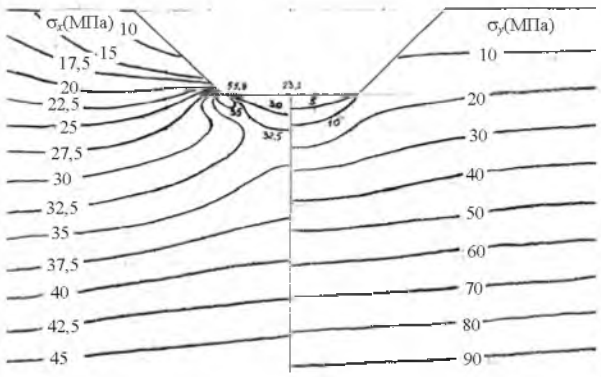


Рис.6. Распределение напряжений по простиранию в массиве при традиционной форме дна при одновременном действии гравитационных и тектонических сил (H = 700 м)

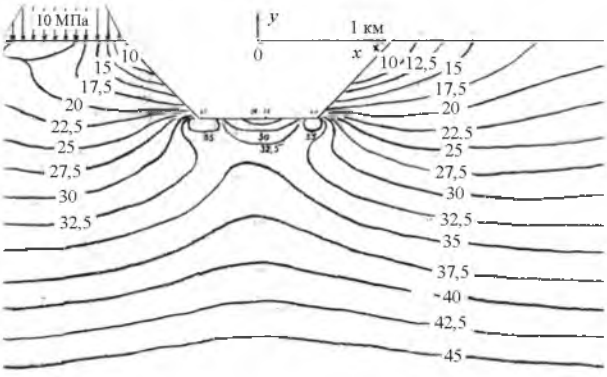


Рис.7. Распределение горизонтальных напряжений по простиранию в массиве при традиционной форме дна с учетом вертикальной пригрузки при действии гравитационных сил (H = 700 м)

мыкающем к борту, напряжения σ_x – сжимающие и по величине находятся в пределах 2,5-5 МПа. В остальном характер распределения горизонтальных и вертикальных напряжений аналогичен предыдущему.

На рис.5 приведены изолинии горизонтальных и вертикальных напряжений для 700-метрового карьера по простиранию при действии грвитационных сил с плоским (рис.5, *а*) и скругленным (рис.5, *б*) дном. Сравнение этих рисунков также показывает, что скругление дна карьера не вносит существенного изменения в картину распределения напряжений. Наблюдается лишь некоторая разница в величине растягивающих напряжений σ_x на границе дна. В обоих случаях на глубине около 300 м от дна растягивающие σ_x переходят в область сжимающих, в борту карьера σ_x = 2,5-5 МПа – сжимающие. На глубине $y > 2h$ от дневной поверхности $\sigma_x = \lambda\gamma y$, $\sigma_y = \gamma y$.

Существенно иной характер распределения напряжений наблюдается в случае одновременного действия гравитационных и тектонических силовых полей. На рис.6 приведены изолинии горизонтальных и вертикальных напряжений в окрестности 700-метрового карьера по простиранию рудного тела. Здесь на «бесконечности» были заданы горизонтальные, равномерно распределенные по глубине силы T_x = –20 МПа. Величина –20 МПа задана, исходя из расчетов напряженного состояния блочных структур Кольского полуострова и результатов натурных определений методом разгрузки.

Напряжения σ_x под дном карьера в 1,5-1,75 раза превышают величину действующих на «бесконечности» напряжений T_x. Причем это превышение распространяется на глубину до 700 м и глубже. В зоне сопряжения борта и дна карьера $\sigma_x \approx$ –60 МПа, т.е. в 3 раза больше действующих на «бесконечности». В нижней части борта напряжения σ_x также имеют высокие значения от 35 до 15 МПа, причем величина градиента их снижения вдоль борта в сторону дневной поверхности составляет примерно 13 МПа на 100 м глубины.

В верхней части борта от 0 до 500 м напряжения σ_x находятся в пределах от 2,5 до 15 МПа. Направление действия максимальных главных напряжений ортогонально борту карьера. Это означает, что в породах борта (особенно в нижней его части) в сочетании с высоким градиентом напряжений создаются условия для образования и раскрытия существующих трещин, нормальных к борту; в дне карьера возможно возникновение горизонтальных трещин и выпучивание пород.

Распределение вертикальных напряжений σ_y практически не отличается от такового же, но при условии действия только гравитационных сил.

Пригрузка на дневной поверхности вблизи борта карьера вертикальными силами, распределенными по трапециевидному закону, имитирующая образование отвала, увеличивает значения горизонтальных напряжений в прибортовой части массива (рис.7).

Здесь σ_x изменяется от 10 до 20 МПа во всей области, располагаемой между бортом карьера, границей пригрузки и глубиной, равной глубине карьера. В остальной части массива распределение горизонтальных напряжений аналогично предыдущему.

Вертикальные напряжения σ_y (рис.8) в этом случае в прибортовой части массива также увеличиваются до 20 МПа на глубине до 400 м от дневной поверхности по сравнению с тем вариантом, когда пригрузка отсутствует, т.е. практически в 2 раза.

В результате выполненных расчетов и проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Влияние карьерной выемки на равномерность распределения естественных напряжений в массиве распространяется на расстояние 1-1,5 характерных размера карьера, т.е. в глубину на $(1\div1{,}5)h$, где h – глубина карьера, а в стороны – на $(1\div1{,}5)L$, где L – горизонтальный размер карьера в его верхней части.

2. В условиях действия только гравитационных сил в породах, располагаемых ниже дна карьера, действуют растягивающие горизонтальные напряжения, что может приводить к образованию вертикальных трещин; а в условиях одновременного действия гравитационных и тектонических сил в этой части массива действуют высокие сжимающие напряжения σ_x, что может приводить к образованию трещин, параллельных дну карьера и выпучиванию его. Это обстоятельство может служить индикатором того, что в массиве действуют горизонтальные сжимающие тектонические напряжения.

3. При одновременном действии гравитационных и тектонических сил в прибортовой части массива пород формируются высокие сжимающие горизонтальные напряжения, особенно в нижней части борта, с величиной градиента вдоль борта $|\overline{g}| \approx 13$ МПа на 100 м.

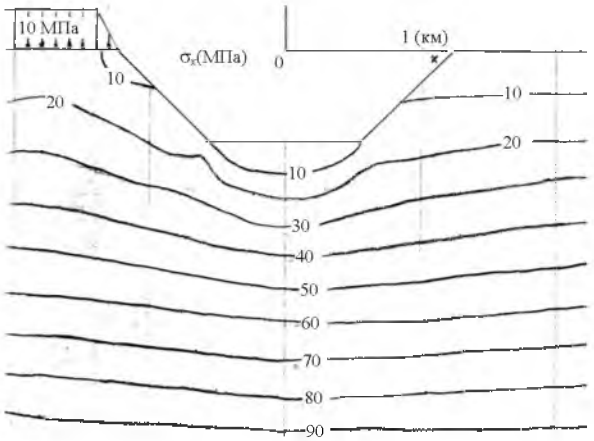


Рис.8. Распределение вертикальных напряжений по простиранию в массиве при традиционной форме дна с учетом вертикальной пригрузки при действии гравитационных сил (H = 700 м)

4. Вертикальная пригрузка на дневной поверхности вблизи борта карьера увеличивает значения сжимающих горизонтальных и вертикальных напряжений в прибортовой части массива.

5. Вертикальные напряжения в основной части массива вблизи карьерной выемки, за исключением случая действия пригрузки, распределяются в соответствии с зависимостью $\sigma_y = \gamma y$, где y – расстояние от дневной поверхности и границы карьера.

Скругление дна карьера приводит к определенным изменениям в характере распределения и величинах напряжений. Однако в выбранном нами примере эти изменения не являются решающими, что обусловливает необходимость поиска более эффективных мероприятий по снижению концентраций напряжений в окрестностях дна глубокого карьера. Одним из таких путей может быть придание нижней части карьера еще большего радиуса скругления, вплоть до придания ей сферической формы.