Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. LXX, вып. 2, 1976 г.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СКАЛЬНЫХ ОТКОСОВ ГЛУБОКИХ И СВЕРХГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

В.Г.Зотеев, В.В.Комаров, А.Ф.Ножин

Обеспечение черной металлургии железорудным сырьем в последующее пятилетие предусматривается в основном за счет дальнейшего развития открытого способа добычи. Наибольшее значение будут иметь карьеры, разрабатывающие глубинную часть крупных месторождений, на долю которых к 1980 г. будет приходиться около 75% всего объема горной массы, разрабатываемой открытым способом, причем 85-90% этого объема будет представлено скальными породами.

Если в 1965 г. средневзвешенная глубина карьеров для всех классов месторождений не превосходила 100 м, то в 1990 г. она превзойдет для всех классов (за исключением четвертого) 220-270 м, причем глубина вреза в скальные породы также будет превышать 200 м. Общий объем горной массы по всем железорудным карьерам к 1990 г. в 2,6 раза превысит уровень 1965 г., в том числе по скальным породам в 3,9 раза. Если учесть, что вынимаемый объем в контуре карьера пропорционален кубу глубины и котангенсу среднего угла погашения борта, то при равной средней погрешности в определении угла погашения борта в 1965 и 1990 гг. ущерб в последнем будет в 30 раз выше (средневзвешенные глубины карьеров соответственно 80 и 250 м).

Таким образом, необходимость совершенствования методики исследований устойчивости бортов карьеров не вызывает сомнений. Положение усложняется тем, что существующие методы расчета, базирующиеся на теории устойчивости трапециевидного выреза в весомой полуплоскости или полупространстве, не учитывают горизонтальную составляющую поля тектонических напряжений. Если такой подход был допустим при малых глубинах карьеров, не превосходящих мощности естественной зоны разгрузки пород, то при заглублении ниже кромки скалы на 100-150 м он может привести к весьма грубым просчетам.

Наличие значительных субгоризонтальных тектонических и остаточных напряжений в массиве скальных пород, которые для ряда районов превосхо-

дят гравитационные вертикальные, должно неизбежно привести при углублении карьеров к активизации процессов разгрузки. Под их воздействием в породах, окружающих карьерную выемку, будут возникать значительные деформации, сопровождающиеся разрушением межблочных связей и контактов и общим разрушением скального массива. Аналогом бортов глубоких карьеров, хорошо изученным в настоящее время, в какой-то степени являются скальные откосы глубоких речных долин и глубоких котлованов. Результаты исследований процессов разгрузки на них сводятся к следующему:

границы зоны разгрузки повторяют контур долины (котлована), причем трещины разгрузки в общем параллельны обнажению (откосу и дну долины);

трещины разгрузки образуются прежде всего за счет раскрытия ранее существовавших систем трещин и имеют ровный профиль, если они образовались за счет раскрытия систем трещин, параллельных склону, и извилистый - при образовании за счет раскрытия двух-трех систем, не параллельных ему;

трещины разгрузки имеют максимальное раскрытие в верхней части склона и закрываются с глубиной (имеют клинообразную форму), в верхней части они обычно заполнены песчано-глинистым материалом;

интенсивность трещин разгрузки и их раскрытие уменьшаются по мере удаления от плоскости обнажения вглубь массива;

не существует принципиального различия в характере и параметрах зон разгрузки, формирующихся в скальных породах осадочного, магматического и метаморфического происхождения;

мощность зоны разгрузки и степень нарушенности пород в ней определяются в первую очередь скоростью углубки долины (котлована), крутизной склонов и характером трещиноватости, в значительно меньшей степени - петрографическим составом скальных пород и активностью процессов выветривания.

Зона разгрузки при углублении карьера развивается следующим образом:

в результате изменения напряженного состояния массива при вскрытии нового горизонта подрезанный пологопадающими трещинами участок массива получает возможность смещения в сторону выемки;

подрезанный участок смещается вглубь массива до тех пор, пока силы трения по контакту пологих трещин не уравновесят горизонтальную составляющую напряжений на границе зоны разгрузки;

при подвижке нижнего уступа вышележащий массив, ранее находившийся в равновесном состоянии, будет перемещаться на ту же величину, обеспечивая разрушение межблочных связей и формирование трещин разгрузки, расширяющихся снизу вверх;

цикл разгрузки полностью повторяется при вскрытии нового горизонта, постановке очередного уступа на предельный контур или частичной разнооке борта (любое нарушение достигнутого равновесия, вплоть до оборки уступов активизирует процесс разгрузки, который затухает лишь после достижения нового равновесного состояния);

под дном карьера вследствие прогиба пород также будет формироваться зона разгрузки, хотя раскрытие трещин в этой части массива будет сравнительно небольшим;

при быстрой углубке карьера деформации разгрузки будут иметь высокую скорость, вследствие чего трещины не успевают заполняться песчано-глинистым материалом, т.е. остаются зияющими;

взрывные работы, производимые в карьере, увеличивают скорость деформации разгрузки скальных пород и сокращают длительность цикла до 3-6 месяцев;

в случаях, когда величина пассивной составляющей напряжений, „вмороженных" в элементарные структурные блоки, будет превосходить прочность породы, следует ожидать самопроизвольного отслаивания и стреляния скальных пород, что и имеет место в действительности.

Исходя из сказанного, введем понятия глубокий и сверхглубокий карьер. Глубоким карьером назовем выемку, глубина вреза которой в скальные породы превышает мощность естественной зоны разгрузки. Сверхглубоким карьером будем называть выемку такой глубины, при которой нарушение напряженного состояния скального массива приводит не только к формированию зоны разгрузки, но и к самопроизвольному делению элементарных структурных блоков, отслаиванию и стреляниюю породы.

Экспериментальные наблюдения за проявлением процессов разгрузки скальных массивов на карьерах были организованы в 1972 г. Использовались пункты опорной сети Центрального карьера Гороблагодатского и Главного карьера Высокогорского рудоуправлений - самых старых из действующих карьеров Урала. В 1973 г. наблюдения по пунктам опорной сети были проведены повторно (третья серия наблюдений).

В качестве примера рассмотрим Центральный карьер, борта которого практически с поверхности сложены крепкими слабовыветрелыми авгитовыми порфиритами и сиенитами (лежачий бок), диабазовыми и пироксен-плагиоклазовыми порфиритами (висячий бок). Пункты опорной сети У и УI (аналитическая сеть первого разряда) были заложены в 1963 г., пункт Х, координаты которого были определены прямой засечкой с пунктов У и УI в 1967 г. При контрольных сериях наблюдений в 1972 и 1973 гг. координаты пунктов У, УI определялись тремя независимыми прямыми засечками с измерением всех трех углов в каждом треугольнике с пунктов триангуляции четвертого класса, удаленных на расстояние 1,5-2,5 км от борта карьера. Положение пункта Х определялось относительно пунктов У и УI. При этом в треугольнике измерялись все углы (в три приема теодолитом ТБ-3) и стороны (квантовым дальномером КДГ-3). Результаты наблюдений приведены в таблице.

Азимуты и углы падения господствующих систем трещин, по которым реализуются межблочные подвижки, связанные с процессом разгрузки, соответственно равны $\alpha_{пр} = 70^0$; $\delta = 20^0$ и $\alpha_{пр} = 253^0$; $\delta = 67^0$.

Ориентировка осей тензора напряжений скального массива следующая: $\sigma_1 = 2{,}3\,H\gamma$; $\alpha_1 = 270^0$; $\delta_1 = 23^0$; $\sigma_2 = H\gamma$; $\alpha_2 = 103^0$; $\delta_2 = 65^0$; $\sigma_3 = 0{,}53\,H\gamma$; $\alpha_3 = 0^0$; $\delta_3 = 7^0$.

Из результатов наблюдений, приведенных в таблице, следует, что наличие горизонтальных напряжений в скальном массиве предопределяет интенсивность процессов разгрузки в породах, слагающих борта карьеров, если глубина их вреза в скальный массив превышает 120-150 м.

Смещение пунктов опорной сети Центрального карьера

Номер пункта	Отметка пункта, м	Расстояние от борта, м	Отметка нижней точки борта, м	Угол наклона борта, град.	Азимут падения борта, град.	Смещение, мм
			Закладка пункта			
У	344,4	3,5	134	40	50	-
УI	265,0	6,0	117	38	60	-
Х	240,4	2,6	178	30	290	-
			2-я серия наблюдений (июнь 1972 г.)			
У	344,4	3,5	103	41	59	103
УI	265,0	6,0	80	40	63	118
Х	240,4	2,6	162	32,5	243	7
			3-я серия наблюдений (май 1973 г.)			
У	344,4	3,5	107	41	47	87
УI	265,0	6,0	40	40	57	247
Х	240,4	2,6	162	32,5	297	16

Результаты многолетних наблюдений за скоростями деформаций скальных уступов, проводившихся на этом карьере в течение 6-10 лет, показали, что максимальная скорость осыпания уступов (до 0,30-0,40 м/год) также характерна для северо-западного и юго-западного участков контура. При этом установлено, что скорость деформаций практически не изменяется в течение всего срока наблюдений, а участки наблюдательных станций находятся за пределами сейсмоопасной (от массовых взрывов) зоны. На участках, где карьер в период времени наблюдений не углублялся (юго-восточный и южный участки карьера), скорость деформаций не превышала 0,10-0,15 см/год.

Таким образом, при врезке карьеров в скальные породы ниже уровня естественной зоны разгрузки следует ожидать деформаций бортов и уступов, связанных с нарушением напряженного состояния скального массива. При этом в районах, где горизонтальная составляющая тензора напряжений в скальных породах существенно превосходит вертикальную (некоторые районы Урала, Тургайский железорудный пояс), этот тип деформаций будет предопределять достижимые углы погашения скальных откосов глубоких и сверхглубоких карьеров. Это связано с тем, что раскрытие трещин будет способствовать увеличению трещинной пустотности скального массива, которая оказывает решающее влияние на показатели его сопротивления сдвигу. Следовательно, для определения углов погашения бортов и уступов глубоких и сверхглубоких карьеров необходимы следующие данные:

ориентировка и величина главных нормальных напряжений, характерных для скального массива рассматриваемого региона;

ориентировка систем трещин, развитых в породах, слагающих борта и уступы карьера, интенсивность трещиноватости и сопротивление сдвигу пород по контактам;

упругие и прочностные характеристики скальных пород и уровень напряжений в них.

Однако даже при наличии указанных данных определение параметров зон разгрузки и оценка устойчивости скальных откосов глубоких и сверхглубоких карьеров существующими методами расчета не обеспечены, так как ни один из них не учитывает горизонтальной составляющей тензора напряжений. Более того, попытка решения задачи на основе теории упругости для глубоких карьеров приведет к абсурдным результатам для регионов с высокими горизонтальными напряжениями: борт будет неустойчив даже при углах погашения $15\text{-}20^{0}$.

Удовлетворительные решения могут быть получены лишь при использовании расчетного метода, учитывающего возможность снятия избыточных напряжений за счет межблочных подвижек и формирования зоны разгрузки. Институт горного дела в настоящее время разработал вариант метода конечных элементов, позволяющий учесть дискретность среды и перераспределение напряжений в скальном массиве. Это позволяет не только оценить устойчивость бортов карьеров при любом исходном тензоре напряжений скального массива, но и рассчитать границы областей зоны разгрузки с заданной трещинной пустотностью. Последнее, в свою очередь, обеспечивает достаточно надежный прогноз скоростей деформаций уступов и позволяет выбирать наиболее эффективные методы борьбы с ними.