ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(5):85-98
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_85

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ЗОН ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ПЕРЕНАПРЯЖЕННОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ

П.А. Корчак

Кировский филиал АО «Апатит», Кировск, Россия, e-mail: pkorchak@phosagro.ru

Аннотация: Выполнен анализ результатов практических и теоретических исследований зависимостей формирования зон хрупкого разрушения пород в перенапряженном породном массиве. Уделено внимание аспектам математического моделирования этих процессов. Показано развитие геомеханических процессов, в результате которых формируется зона хрупкого разрушения, которая может быть описана с применением моделей деформирования среды, сформулированных в рамках теории пластического течения, где показатели прочностных характеристик являются функцией от достигнутой величины пластических деформаций формоизменения (закон упрочнения/разупрочнения среды). На основании математического моделирования выполнен прогноз зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений горных выработок различной конфигурации. Установлено влияние конфигурации сопряжения и формы горной выработки на размер зоны хрупкого разрушения. Полученные зависимости изменения размера зоны хрупкого разрушения от величин, действующих в породном массиве напряжений, и характеристик среды обобщены в виде аналитической зависимости. Полученные результаты исследований используются при выборе параметров крепей горных выработок, расположенных в перенапряженных монолитных, слабо- и среднетрещиноватых массивах.

Ключевые слова: горная порода, напряжения, хрупкое разрушение, сопряжение, горная выработка, геомеханическая модель.

Для цитирования: *Корчак П. А.* Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 85–98. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_85.

Geomechanical prediction of growth of brittle fracture zones in the vicinity of underground excavations in over-stress rock mass

P.A. Korchak

Kirovsk Branch of Apatit, Kirovsk, Russia, e-mail: pkorchak@phosagro.ru

Abstract: The theoretical and applied research data on formation of brittle fracture zones in over-stress rock mass are reviewed. The mathematical modeling of the related processes is discussed. It is shown how geomechanical processes develop up to formation of a brittle fracture zone. The latter can be described using the deformation models formulated within the theory ofplastic flow, with strength characteristics determined as functions of plastic strains of (harden-

© П.А. Корчак. 2021.

ing/softening law). Based on the mathematical modeling, prediction of brittle fracture zones at junctions of underground excavations of different geometry is implemented. It is found that the geometry of junctions and excavations has influence on the size of the brittle fracture zone. The relationships of change in the brittle fracture zone size versus effective stresses and characteristics of rock mass are generalized in the form of an analytical dependence. The research results are used in design of support systems for underground openings in over-stress rock mass (massive and weak or heavily jointed).

Key words: rock, stress, brittle fracture, junction, underground excavation, geomechanical model.

For citation: Korchak P. A. Geomechanical prediction of growth of brittle fracture zones in the vicinity of underground excavations in over-stress rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5):85-98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_85.

Введение

Развитие геомеханических процессов при проведении горных выработок в слаботрещиноватом перенапряженном породном массиве характеризуется формированием зон хрупкого разрушения. Интенсивность проявления данных геомеханических процессов определяется величиной напряженного состояния породного массива и соотношением между главными компонентами напряжений, а также механическими характеристиками пород, слагающих породный массив. При благоприятных условиях разрушение горных пород не происходит, а формируется развитие локальных микротрещин в породном массиве. По мере увеличения напряжений происходит прорастание микротрещин, и порода начинает отслаиваться от контура выработки в квазистатическом режиме. Зоны хрупкого разрушения приурочены к участкам концентрации напряжений и редко на практике охватывают весь контур выработки, формируя *V*-образную зону обрушения. При неблагоприятных условиях процесс хрупкого разрушения может сопровождаться геодинамическими процессами — от шелушения пород в приконтурной области до горного удара. В окрестности данного участка породы обычно находятся в устойчивом состоянии. Таким образом, процесс хрупкого разрушения породы — это процесс, который включает формирование трещин отрыва, совпадающих с направлением развития максимальных тангенциальных напряжений. Формирующиеся продольные трещины разбивают массив на отдельности в форме пластин. Процесс разрушения/потери устойчивости таких пластин приводит к обрушению разрушенной породной массы и формированию локальных зон обрушения. Если процесс разрушения породных пластин происходит постепенно и разнесен по времени, то наблюдаются только квазистатические геомеханические процессы. Если же в процесс разрушения вовлекается значительный объем породных пластин и этот процесс происходит за короткий период времени, то тогда наблюдается динамическое проявление геомеханических процессов и происходит горный удар. Дополнительную опасность представляет участок разрушенных напряжениями, но не обрушенных пород. Если на данном участке выполняются дополнительные проходческие работы (сооружение сопряжения), или он находится в зоне влияния очистных работ, уменьшение тангенциальных напряжений может привести к обрушению разрушенной породной массы.

Вопросы хрупкого разрушения горной породы в окрестности горных выработок рассмотрены в многочисленных отечественных [1 — 4] и зарубежных научных публикациях [5 — 8]. В работах представлены как результаты натурных наблюдений за формированием зон хрупких разрушений, лабораторные исследования, так и методы их прогноза в различных горно-геологических условиях. Анализ методов прогноза развития зон хрупкого разрушения позволил установить, что на практике удовлетворительную сходимость с результатами фактических наблюдений можно добиться за счет решения задач механики сплошной среды численными методами анализа. Особое внимание необходимо уделять выбору модели деформирования и разрушения горной породы, что предопределяет достоверность прогнозируемых процессов. Модель деформирования среды, как показано в работе [9, 10], должна позволять варьировать параметры модели, отвечающие за положение и форму поверхности пластического течения, как функцию от достигнутой величины деформаций формоизменения.

Автором предложена упругопластическая модель с хрупким характером разрушения, основанная на условии пластичности Хока-Брауна, где достижение напряжениями предельного значения мгновенно изменяет параметры модели с пиковых на остаточные. Представленный подход к моделированию хрупкого разрушения в окрестности горных выработок позволил получить хорошее согласие между размерами зон хрупкого разрушения, наблюдаемых в натурных условиях, и результатами математического моделирования [11]. Более полно процесс хрупкого разрушения породы можно описать через модель упрочняющейся/разупрочняющейся среды [12 — 14], где величина сцепления и угла внутреннего трения изменяются по мере накопления пластических деформаций. При этом в отличие от идеально хрупкой среды данный подход позволяет в явном виде учесть переход от модели с чистым сцеплением к модели, где прочность формируется преимущественно за счет трения между частицами. Необходимо также отметить методы, основанные на механике дискретно-сплошной среды (метод конечно-дискретных элементов) [15], которые в настоящее время получают все большее распространение и используются для решения различных задач механики разрушения горных пород [16, 17] и в частности прогноза развития геомеханических и геодинамических процессов в окрестности горных выработок [18 — 21]. Несмотря на широкое распространение данного метода для решения задач хрупкого разрушения различных сред, в области геомеханики его в основном используют для решения задач, которые можно рассмотреть в плоско-деформационной постановке. Это связано со значительными требованиями к вычислительным ресурсам.

В выполненных на настоящий момент исследованиях в основном рассмотрено формирование зон хрупкого разрушения в окрестности одиночных горных выработок. Эти исследования включают в себя как обобщения результатов лабораторных исследований и натурных наблюдений за формированием зон хрупкого разрушения пород в окрестности горной выработки, так и теоретические исследования, которые посвящены вопросам разработки математического аппарата, позволяющего повысить достоверность прогноза формирования таких зон. Сопряжения горных выработок являются типовыми элементами при разработке месторождений полезных ископаемых, и в тоже время развитие геомеханических процессов в их окрестности, и, в частности, зон хрупкого разрушения, является значительно менее изу-

ченным, чем на протяженном участке горной выработки. В работе основное внимание уделено вопросам формирования зон хрупкого разрушения породного массива в окрестности сопряжений горных выработок и изучению влияния формы сопряжений на развитие геомеханических процессов.

Развитие зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений горных выработок на месторождениях Кировского филиала АО «Апатит»

Проведение горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» сопровождается развитием геомеханических и геодинамических процессов, которые могут привести к частичной или полной потере устойчивости горных выработок и осложняют их проведение. Достоверный прогноз развития этих процессов позволит повысить безопасность ведения проходческих работ и снизит затраты не ремонт и перекрепление участков горных выработок. С учетом сложных горно-геологических условий проведения горных выработок, в том числе наличие по трассе выработок меняющихся геологический условий, прогноз таких процессов весьма затруднителен. Принятая на настоящий момент методика прогноза геомеханических процессов не отражает фактическое состояние их развития в окрестности породного обнажения, и необходимо выполнить ее обновление.

В данной работе основное внимание уделено вопросам оценки устойчивости и прогнозу развития геомеханических процессов в перенапряженных породных массивах — от монолитных до слаботрещиноватых. По классификации КФ АО «Апатит» такие условия относятся к категориям состояния горных выработок «Г» и «Д», краткое описание развития геомеханических процессов в которых сведено в табл. 1. Однако такое подразделение на категории только качественно описывает те процессы, которые ожидаются при проведении горной выработок, и не дают количественной оценки.

Примеры хрупкого разрушения пород в окрестности горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» представлены на рис. 1. Как видно (см. рис. 1, *а*, *б*), разрушение пород в окрестности одиночных выработок преимущественно происходит в своде выработки и формирует *V*-образный участок обрушения, при этом бока выработки полностью устойчивы. То есть наблюдается классическая картина разрушения пород в массивах, где преимущественно действуют горизонтальные напряжения. При рассмотрении картины разрушения пород

Таблица 1

Классификация категорий состояния горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит»
Classification of roadway state categories in mines of Apatit's Kirovsk Division

Категория состояния горной выработки	Описание возможных вариантов ожидаемых геомеханических/геодинамических процессов
Г	Интенсивное шелушение, динамическое заколообразование пород в течение 6—12 ч после отпала, эллипсовидная форма «стаканов» от взрывных скважин.
Д	Интенсивное динамическое заколообразование, не затухающее несколько суток стреляние, эллипсовидная форма «стаканов» от взрывных скважин, образование «дорожек» на стенках шпуров и скважин. Длительность процесса до 2-х и более суток.

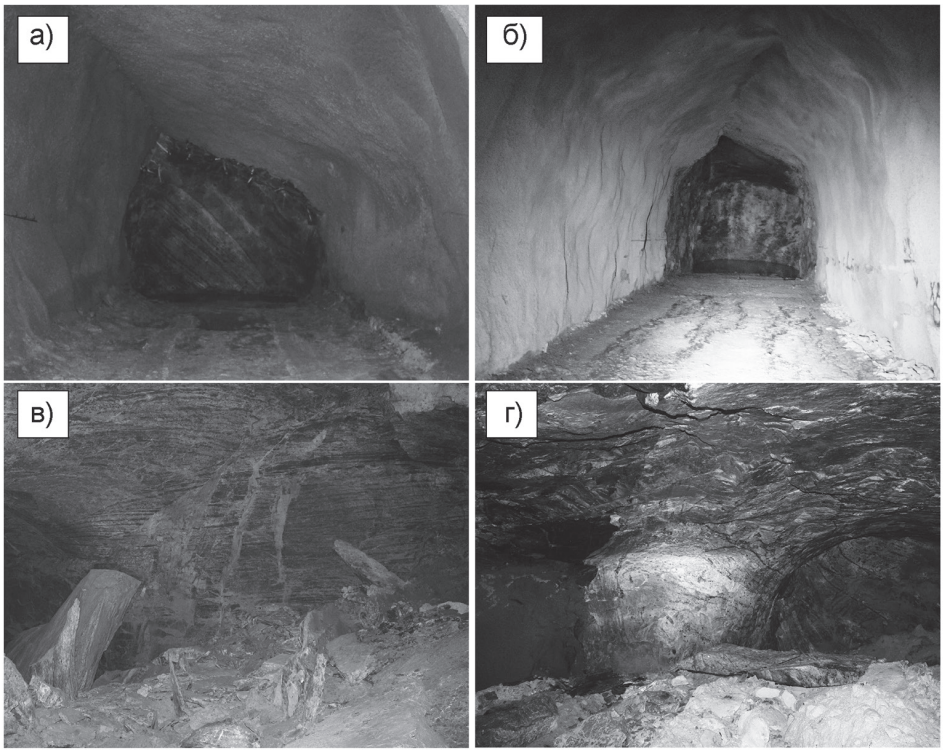

Рис. 1. Примеры зон хрупкого разрушения породного массива в окрестности горных выработок: одиночные выработки (а, б); сопряжение горных выработок (в, г)

Fig. 1. Brittle fracture zones in surrounding rock mass around underground excavations: single roadways (a, b); roadway junction (v-g)

на участках сопряжения горных выработок (см. рис. 1, *в*, *г*), помимо формирования зоны хрупкого разрушения в своде выработки, наблюдается разрушение и в боках выработки. Разрушение пород проявляется в виде отслаивания пластин пород от основного породного массива с дальнейшим их обрушением (в своде выработки) или выдавливанием (преимущественно в боках выработки). Необходимо также отметить, что зоны хрупкого разрушения формируются не только непосредственно над сводом выработки (см. рис. 1, *б*), но и смещены относительно него (см. рис. 1, *а*), что позволяет говорить, что направление главных напряжений не всегда совпадает с направлением вертикальных и горизонтальных напряжений.

Разрушение хрупкого породного массива в окрестности горной выработки проявляется в виде шелушения или отслаивания породы, в результате которой формируется *V*-образная зона, а само разрушение может происходить как в виде монотонного, практически квазистатического разрушения, так и в виде динамического разрушения, локального горного удара.

Размеры этих зон изменяются от нескольких сантиметров до метра, а иногда и более.

На параметры зоны разрушения оказывают влияние начальное напряженное состояние, соотношение между главными максимальными и минимальными нормальными напряжениями и форма поперечного сечения горной выработки.

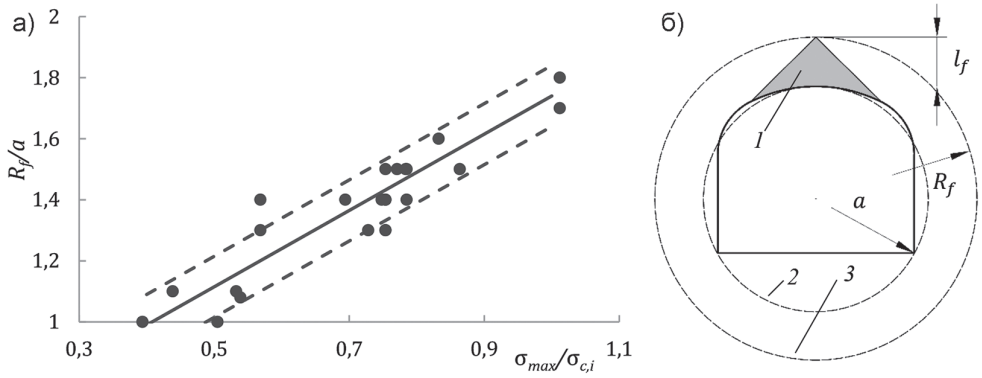

Рис. 2. Диаграмма взаимосвязи между напряженным состоянием породного массива, прочностью породного массива и размерами зоны хрупкого разрушения [10]: результаты натурных замеров зоны хрупкого разрушения (а); схема формирования зоны хрупкого разрушения (б); 1 — зона хрупкого разрушения; 2 — граница эквивалентного радиуса; 3 — граница радиуса зоны хрупкого разрушения; R_f — эквивалентный радиус зоны хрупкого разрушения; а — эквивалентный радиус выработки

Fig. 2. Diagram of interrelation between rock mass stresses and strength and sizes of brittle fracture zone [10]: in-situ measurements of brittle fracture zone sizes (a); brittle fracture zone layout (b); 1 — brittle fracture zone; 2 — equivalent radius; 3 — brittle fracture zone radius; R_f — equivalent radius of brittle fracture zone; a — equivalent radius of roadway

Обработка результатов натурных наблюдений за развитием зон хрупкого разрушения в окрестности выработок (рис. 2) позволила установить следующую линейную зависимость, с помощью которой можно определить усредненный размер этой зоны для различных горно-геологических условий [10]:

$$\frac{R_f}{a} = 0,49\left(\pm 0,1\right) + 1,25\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{c.i}};$$

$$\sigma_{\max} = 3\sigma_1 - \sigma_3, \qquad (1)$$

где σ_1, σ_3 — соответственно главные максимальные и минимальные нормальные напряжения; $\sigma_{\max}$ — максимальные напряжения; $\sigma_{c.i}$ — прочность породы в условиях одноосного сжатия; a — эквивалентный радиус горной выработки; R_f — эквивалентный радиус зоны хрупкого разрушения.

Тогда абсолютный размер зоны разрушенной породы l_f определим как

$$l_f = R_f - a. \qquad (2)$$

Представленные выше результаты натурных наблюдений за формированием зон хрупкого разрушения породного массива характерны для одиночной выработки, расположенной в практически монолитном породном массиве. В нарушенных естественными трещинами перенапряженных породных массивах, как показано в работе [21], размер зоны хрупкого разрушения может увеличиться, однако вопросы развития этих зон на участках сопряжения горных выработок не получили широкого освещения. В научных публикациях практически не уделено внимание формированию зон хрупкого разрушения пород на участках сопряжения горных выработок. Ниже представлена методика и результаты прогноза развития зон хрупкого разрушения породного массива на участках сопряжения горных выработок.

Численное моделирование развития зон хрупкого разрушения породного массива на участке сопряжения горных выработок

Прогноз развития зон хрупкого разрушения в породном массиве на участке

сопряжения горных выработок выполнялся в пространственной постановке. Рассмотрены три типовых сопряжения горных выработок, применяемых для условий КФ АО «Апатит»: трехстороннее Т-образное сопряжение с плоским сводом (рис. 3, *а*); четырехстороннее сопряжение с плоским сводом (рис. 3, *б*); четырехстороннее сопряжение с арочным сводом (рис. 3, *в*).

Моделирование развития напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности сопряжений горных выработок выполнялось в условиях постоянного по высоте модели начального напряжения, которое задавалось в виде:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}, \qquad (3)$$

где σ_1, σ_2, σ_3 — главные максимальные, средние и минимальные нормальные напряжения.

Направление главных напряжений условно принято совпадающим с направлением вертикальных и горизонтальных напряжений. Граничные условия при выполнении численного моделирования приняты следующими: смещения в направлении, перпендикулярном поверхностям модели, запрещены; границы модели удалены от участка сопряжения на 10 эквивалентных диаметров выработки, что достаточно для минимизации влияния граничных условий на развитие напряженно-деформированного состояния в окрестности сопряжения; размеры сопрягающихся выработок принимались равными друг другу.

На основании предварительно выполненных расчетов в плоско-деформационной постановке [22] было показано, что вращение главных площадок напряжений относительно глобальной системы координат на угол θ оказывает значительное влияние на положение зоны хрупкого обрушения относительно свода выработки, в то время как размер зоны хрупкого разрушения (расстояние от края размера зоны хрупкого разрушения до контура выработки по нормали) практически не меняется от угла θ и максимален при $\theta = 0°$. Таким образом, при выполнении расчетов в окрестности сопряжений все расчеты выполнены при $\theta = 0°$ (максимальные главные напряжения ориентированы вдоль оси одной из сопрягаемых выработок, средние главные напряжения совпадают с осью второй сопрягаемой выработки, минимальные главные напряжения совпадают с направлением действия вертикальных напряжений).

В качестве модели деформирования среды принята упругопластическая модель, позволяющая учесть упрочнение/разупрочнение (рис. 4, *б*, диаграмма представлена через условные, относительные показатели c_{max}/c_i, φ_{max}/φ_i, $R_{t.max}/R_{t.i}$ —

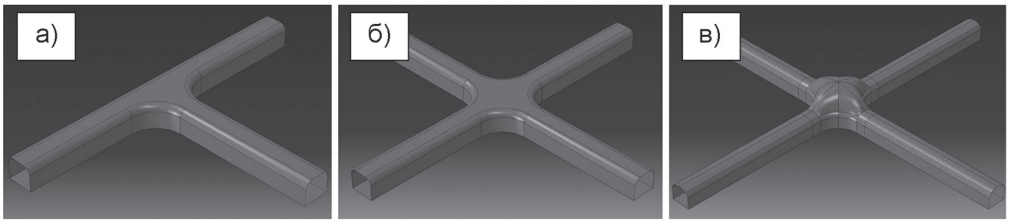

Рис. 3. Модели типовых сопряжений горных выработок для условий рудников АО «Апатит»: а, б, в — соответственно сопряжения типа 1, 2, 3

Fig. 3. Models of standard junctions of underground excavations in Apatit's mines: (a), (b) and (v) — junction types 1, 2 and 3, respectively

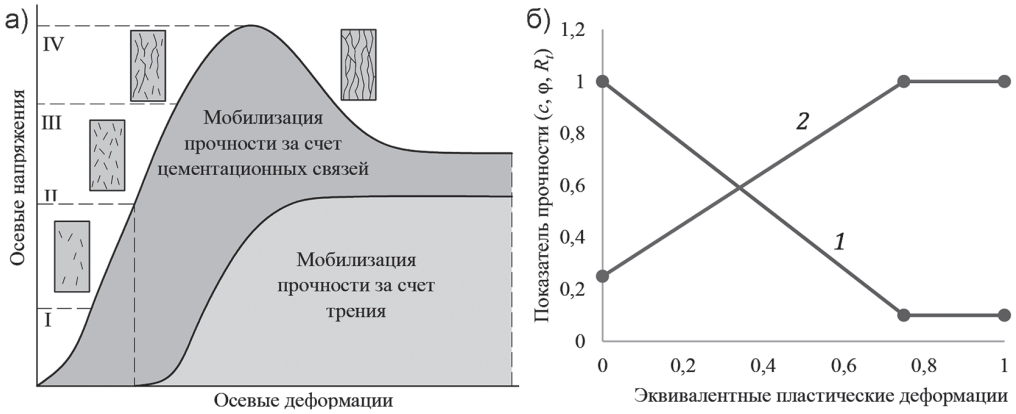

Рис. 4. Характер мобилизации прочности горной породы [14] (а) и графическое изображение параметров упрочнения/разупрочнения среды (б): I — участок закрытия трещин; II — участок зарождения новых трещин; III — участок развития трещин; IV — участок интенсивного развития трещин; 1 — изменение показателя сцепления и прочности в условиях одноосного растяжения; 2 — изменение угла внутреннего трения

Fig. 4. Mobilization mechanism of strength in rocks [14] (a) and graphic presentation of hardening/softening parameters (b): I — closure of cracks; II — initiation of new cracks; III — growth of cracks; IV — intensive propagation of cracks; 1 — change in cohesion and strength under uniaxial tension; 2 — change in internal friction angle

где c_{max}, φ_{max}, $R_{t.max}$ — пиковые значения сцепления, угла внутреннего трения и прочности в условиях одноосного растяжения; c_i, φ_i, $R_{t.i}$ — значения сцепления, угла внутреннего трения и прочности в условиях одноосного растяжения соответствующие достигнутой величине эквивалентных пластических деформаций). Упрочнение/разупрочнение среды активируется в условный момент начала активного развития микротрещин в породе. В работе [16] показано, что начальная прочность образца до момента активного развития микротрещин формируется преимущественно за счет цементационных связей, в то время как внутреннее трение не оказывает значительного влияния на прочность породы (рис. 4, *а*). По мере увеличения нагрузки и формирования новых микротрещин количество цементационных связей уменьшается, а угол внутреннего трения увеличивается, также увеличивается и доля его влияния на прочность породы.

Анализ данных лабораторных исследований горных пород показывает [12], что величина угла внутреннего трения увеличивается от начального значения до пикового. После достижения критической величины деформаций угол внутреннего трения больше не изменяется и остается постоянным. Сцепление и прочность породы в условиях одноосного растяжения уменьшаются от максимального значения до практически нулевого значения по мере достижения критических деформаций формоизменения. За критическое значение деформаций формоизменения принимается величина деформаций на момент достижения остаточной прочности. Угол дилатансии при этом принимается равным величине близкой к нулю при прогнозе развития зоны хрупкого разрушения в своде выработки, где возможна потеря обжатия породы. Его величина должна определяться на основании сопоставления размера зоны хрупкого разрушения в почве выработки и прогнозируемой величиной хрупкого разрушения. Несмотря на то, что законы упрочнения/разупрочнения в целом являются нелинейными, при

отсутствии детальных результатов лабораторных испытаний допускается их аппроксимирование прямолинейными участками.

Деградацию цементационных связей и мобилизацию трения можно связать с увеличением эквивалентных пластических деформаций по следующим формулам [14]:

$$c = c_r + \left(c_i - c_r\right)\left[2 - \frac{2}{1 + \exp\left(-5\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p^r}\right)}\right];$$

$$\varphi = \varphi_r + \left(\varphi_i - \varphi_r\right)\left[2 - \frac{2}{1 + \exp\left(-5\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p^r}\right)}\right];$$

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3}\left[\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2\right)^2 + \left(\varepsilon_2 - \varepsilon_3\right)^2 + \left(\varepsilon_1 - \varepsilon_3\right)^2\right]} \quad (4)$$

где c_i — начальное значение сцепления; c_r — остаточная величина сцепления; ε_p — эквивалентные пластические деформации; φ_i — начальное значение угла внутреннего трения; φ_r — остаточная величина угла внутреннего трения на момент разрушения всех цементационных связей; ε^r_p — эквивалентные пластические деформации на момент достижения остаточной прочности; ε_1, ε_2, ε_3 — соответственно главные максимальные, средние и минимальные нормальные деформации.

Таким образом, для описания поведения породного массива в рамках рассмотренной модели, которая контролируется законами упрочнения/разупрочнения, используется следующий набор параметров, характеризующий развитие упругих/пластических деформаций: модуль деформации породного массива E_m; коэффициент поперечной деформации породного массива v_m; диаграмма изменения угла внутреннего трения (упрочнение) по мере роста деформаций формоизменения; диаграммы изменения сцепления и прочности породы в условиях одноосного сжатия (разупрочнение) по мере роста деформаций формоизменения; диаграмма изменения угла дилатансии пород по мере роста деформаций формоизменения.

Результаты прогноза размеров зон хрупкого разрушения

Результаты формирования зон нарушенных пород в окрестности сопряжений обобщены в виде набора зависимостей (рис. 5), характеризующих изменение относительного размера зоны нарушенных пород от относительного показателя напряженного состояния породного массива. Детальные результаты расчета зон хрупкого разрушения для четырех-

Таблица 2

Размеры зон нарушенных пород в окрестности сопряжений
Sizes of damaged rock zones in the vicinity of junctions

Тип сопряжения	Размер зоны нарушенных пород (м) в окрестности сопряжений при значении показателя $\sigma_1/R_{сж}$				
	0,2	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**
Четырехстороннее сопряжение, плоский свод	0,10 — 0,27	0,13 — 0,33	0,34 — 0,47	0,60 — 0,65	0,85 — 0,86
Четырехстороннее сопряжение, арочный свод	0,06 — 0,23	0,15 — 0,31	0,25 — 0,40	0,35 — 0,45	0,46 — 0,50

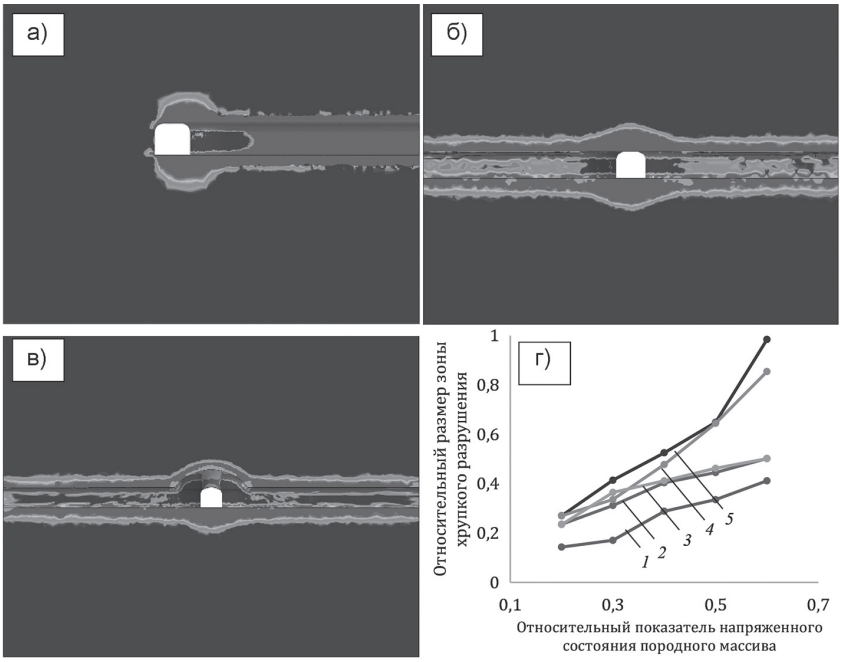

Рис. 5. Картины развития зон хрупкого разрушения в окрестности трехстороннего сопряжения (а), четырехстороннего сопряжения с плоским сводом (б), четырехстороннего сопряжения с арочным сводом (в) и результирующая диаграмма размеров зон хрупкого разрушения над центром сопряжения горных выработок (г): 1 — одиночная выработка (арочный свод); 2 — одиночная выработка (плоский свод); 3 — четырехстороннее сопряжение (арочный свод); 4 — трехстороннее сопряжение (плоский свод); 5 — четырехстороннее сопряжение (плоский свод)

Fig. 5. Patterns of brittle fracture zones in the vicinity of three-way junction (a), four-way junction with flat roof (b), four-way junction with arched roof (c) and resultant sizes of brittle fracture zones above the center of roadway junction (d): 1 — single roadway (arched roof); 2 — single roadway (flat roof); 3 — four-way junction (arched roof); 4 — three-way junction (flat roof); 5 — four-way junction (flat roof)

стороннего сопряжения с плоским и арочным сводами сведены в табл. 2.

Эти результаты позволяют получить представление о формировании зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок.

Можно выявить следующие общие тенденции:

- размер зоны хрупкого разрушения увеличивается по мере роста показателя относительной напряженности породного массива для всех рассмотренных типов сопряжений;
- рост размера зоны хрупкого разрушения в целом соответствует линейной зависимости;
- неопределенность в величине размера зоны хрупкого разрушения пород снижается по мере роста показателя относительной напряженности;
- в общем случае размер зоны хрупкого разрушения меньше в сопряжениях с арочным сводом по сравнению с сопряжениями с плоским сводом;
- размер зоны хрупкого разрушения над четырехсторонним сопряжением с арочным сводом меньше практически в два раза по отношению к четырехстороннему сопряжению с плоским сводом;
- зона хрупкого разрушения пород охватывает весь свод сопряжения только при показателе относительного нап-

ряженного состояния породного массива 0,4 и более;

- размер зоны хрупкого разрушения пород на участке сопряжения по длине сопрягающихся выработок различен, что связано с различием в величинах наибольших и наименьших горизонтальных напряжений.

В целом форма зоны хрупкого разрушения пород напоминает полусферу эллипсовидной формы.

В заключение выполним сравнение размеров зон хрупкого разрушения пород, полученных для одиночных выработок, и сопряжений горных выработок (см. рис. 5). Видно, что размер хрупкого разрушения в окрестности сопряжений выше по отношению к одиночной выработке. Особенно это становится заметно при увеличении показателя напряженного состояния породного массива с 0,4 до 0,6. Как уже было отмечено выше, среди рассмотренных сопряжений выделяется четырехстороннее сопряжение, величина хрупкого разрушения пород в окрестности которого ближе к размеру, получаемому в окрестности одиночной выработки. Это позволяет говорить о благоприятном влиянии сводчатой формы сопряжения на размер зоны хрупкого разрушения пород.

На основании проведенных расчетов определены коэффициенты перехода от зоны хрупкого разрушения пород в окрестности одиночной выработки к сопряжению горных выработок. Для сопряжения типа 1 (трехстороннее сопряжение) коэффициент перехода $k_п$ = 1,6, для сопряжения типа 2 (четырехстороннее сопряжение с плоским сводом) коэффициент перехода $k_п$ = 1,8, для сопряжения типа 3 (четырехстороннее сопряжение с арочным сводом) коэффициент перехода $k_п$ = 1,4.

С учетом выполненных ранее исследований [22] формулу для расчета размера зоны хрупкого разрушения пород на участке сопряжения горных выработок можно представить следующим образом:

$$h_н = k_з k_д k_п b \qquad (5)$$

где b — ширина одиночной; $k_д$ — относительный показатель напряженного состояния, соответственно $k_д$ = 0,05 для категорий В, $k_д$ = 0,2 для категорий Г, $k_д$ = 0,35 для категории состояния выработки Д; $k_д$ > 0,35 для категории состояния горной выработки «опасно»; $k_п$ — коэффициент формы горной выработки, для одиночной выработки $k_п$ = 1, для трехстороннего сопряжения $k_п$ = 1,6, для четырехстороннего сопряжения $k_п$ = 1,8, $k_з$ — коэффициент запаса 1,15.

Заключение

В работе представлена методика прогноза зон хрупкого разрушения породного массива на участке сопряжения горных выработок. Показано, что для прогноза зон хрупкого разрушения породного массива в окрестности породных обнажений можно использовать упругопластическую модель, учитывающую изменение показателей пластичности от достигнутой величины пластических деформаций формоизменения. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что размер зоны хрупкого разрушения напрямую зависит от типа сопряжения и его формы. На величину размера зоны хрупкого разрушения значительное влияние оказывает наличие или отсутствие арочного свода. Размер зоны хрупкого разрушения в зависимости от типа сопряжения по отношению к размеру этой зоны в своде одиночной выработки отличается в 1,4–1,8 раза. На основании выполненного исследования предложена аналитическая зависимость, позволяющая в упрощенном виде определять размер зоны хрупкого разрушения как в своде одиночных выработок, так и над типовыми сопряжениями горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козырев А. А.*, *Панин В. И.*, *Федотов Ю. В.* Проблемы безопасности при ведении горных работ в высоконапряженных породных массивах // Записки горного института. — 2012. — т. 198. — С. 150—156.

2. *Козырев А. А. Савченко С. С.* Об управлении напряженно-деформированным состоянием массива горных пород при проходке горных выработок в удароопасных условиях // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2014. — т. 17. — С. 221—224.

3. *Абрамов Н. Н.*, *Епимахов Ю. А.* Особенности проходки большепролетной выработки в условиях сложного напряженно-деформированного состояния скального массива // Горная промышленность. — 2013. — № 3 (109). — С. 90—95.

4. *Боликов В. Е.*, *Поль В. Г.* Обеспечение устойчивости горных выработок в удароопасных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 5. — С. 121—122.

5. *Kaiser P. K.*, *McCreath D. R.*, *Tannant D. D.* Canadian rockburst support handbook. Geomechanics Research Centre and CAMIRO, 1995.

6. *Martin C. D.*, *Read R. S.*, *Martino J. B.* Observations of brittle failure around a circular test tunnel // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997, vol. 34, no. 7, pp. 1065—1073.

7. *Diederichs M. S.*, *Kaiser P. K.*, *Eberhardt E.* Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004, vol. 41, no. 5, pp. 785—812.

8. *Lee S. M.*, *Park B. S.*, *Lee S. W.* Analysis of rockbursts that have occurred in a waterway tunnel in Korea // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004, vol. 41, no. 3, pp. 545.

9. *Diederichs M. S.* Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criterion for deep tunneling // Canadian Geotechnical Journal. 2007, vol. 44, pp. 1082—1116.

10. *Matrin C. D.*, *Kaiser P. K.* Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels // Canadian Geotechnical Journal. 1999, vol. 36, pp. 136—151.

11. *Korchak P. A.* Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in overstressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit» // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 56, article 02023.

12. *Renami H. R.*, *Martin C. D.* Cohesion degradation and friction mobilization in brittle failure of rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2018, vol. 106, pp. 1—13.

13. *Lajtai E. Z.*, *Dzik E.* Searching for the damage threshold in intact rock / Proceeding of Rock Mechanics — NARMS. 1996, vol. 1, pp. 701—708.

14. *Hajiabdolmajid V.*, *Kaiser P. K.*, *Martin C. D.* Modelling brittle failure of rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2002, vol. 39, pp. 731–741.

15. *Munjiza A.*, *Andrews K. R. F*, *White J. K.* Combined single and smeared crack model in combined finite-discrete element analysis // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1999, vol. 44, no. 1, pp. 41—57.

16. *Mahabadi O. K.*, *Cottrell B. E.*, *Grasselli G.* An example of realistic modelling of rock dynamics problems: FEM/DEM simulation of dynamic Brazilian test on Barregranite // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2010, vol. 43, no. 6, pp. 707—716.

17. *Protosenia A. G.*, *Karasev M. A.*, *Verbilo P. E.* Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018, vol. 9, no. 11, pp. 1962—1972.

18. *Lisjak A., Grasselli G., Vietor T.* Continuume discontinuum analysis of failure mechanisms around unsupported circular excavations in anisotropic clay shales // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014, vol. 65, pp. 96—115.

19. *Barton N., Shen B.* Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016, vol. 9, no. 2, pp. 1—16.

20. *Protosenia A. G., Karasev M. A., Ochkurov V. I.* Introduction of the method of finite-discrete elements into the Abaqus/Explicit software complex for modeling deformation and fracture of rocks // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017, vol. 6/7, no. 90, pp. 11—18.

21. *Vazaios I., Diederichs M. S., Vlachopoulos N.* Assessment of strain bursting in deep tunnelling by using the finite-discrete element method // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 12—37.

22. *Корчак П. А.* Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности породных обнажений различной конфигурации / Научные основы безопасности горных работ. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. — М.: ИПКОН РАН, 2018. — С. 150—156. ГИАБ

REFERENCES

1. Kozyrev A. A., Panin V. I., Fedotov Yu. V. Safety problems in mining in high-stress rock masses. *Journal of Mining Institute*. 2012, vol. 198, pp. 150—156. [In Russ].

2. Kozyrev A. A. Savchenko S. S. Stress and strain control during heading operations in rock mass under conditions of rockburst hazard. *Vestnik Murmanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta.* 2014, vol. 17, pp. 221—224. [In Russ].

3. Abramov N. N., Epimakhov Yu. A. Large-span drivage in rock mass under complex stresses and strains. *Russian Mining Industry Journal*. 2013, no. 3 (109), pp. 90—95. [In Russ].

4. Bolikov V. E., Pol' V. G. Stability of underground openings under conditions of rockburst hazard. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2003, no. 5, pp. 121—122. [In Russ].

5. Kaiser P. K., McCreath D. R., Tannant D. D. *Canadian rockburst support handbook*. Geomechanics Research Centre and CAMIRO, 1995.

6. Martin C. D., Read R. S., Martino J. B. Observations of brittle failure around a circular test tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997, vol. 34, no. 7, pp. 1065—1073.

7. Diederichs M. S., Kaiser P. K., Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2004, vol. 41, no. 5, pp. 785—812.

8. Lee S. M., Park B. S., Lee S. W. Analysis of rockbursts that have occurred in a waterway tunnel in Korea. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004, vol. 41, no. 3, pp. 545.

9. Diederichs M. S. Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criterion for deep tunneling. *Canadian Geotechnical Journal*. 2007, vol. 44, pp. 1082—1116.

10. Matrin C. D., Kaiser P. K. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*. 1999, vol. 36, pp. 136—151.

11. Korchak P. A. Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in overstressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit». *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 56, article 02023.

12. Renami H. R., Martin C. D. Cohesion degradation and friction mobilization in brittle failure of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 2018, vol. 106, pp. 1—13.

13. Lajtai E. Z., Dzik E. Searching for the damage threshold in intact rock. *Proceeding of Rock Mechanics — NARMS*. 1996, vol. 1, pp. 701 — 708.

14. Hajiabdolmajid V., Kaiser P. K., Martin C. D. Modelling brittle failure of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 2002, vol. 39, pp. 731–741.

15. Munjiza A., Andrews K. R. F, White J. K. Combined single and smeared crack model in combined finite-discrete element analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1999, vol. 44, no. 1, pp. 41 — 57.

16. Mahabadi O. K., Cottrell B. E., Grasselli G. An example of realistic modelling of rock dynamics problems: FEM/DEM simulation of dynamic Brazilian test on Barregranite. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2010, vol. 43, no. 6, pp. 707 — 716.

17. Protosenia A. G., Karasev M. A., Verbilo P. E. Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 11, pp. 1962 — 1972.

18. Lisjak A., Grasselli G., Vietor T. Continuume discontinuum analysis of failure mechanisms around unsupported circular excavations in anisotropic clay shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014, vol. 65, pp. 96 — 115.

19. Barton N., Shen B. Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016, vol. 9, no. 2, pp. 1 — 16.

20. Protosenia A. G., Karasev M. A., Ochkurov V. I. Introduction of the method of finite-discrete elements into the Abaqus/Explicit software complex for modeling deformation and fracture of rocks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 6/7, no. 90, pp. 11 — 18.

21. Vazaios I., Diederichs M. S., Vlachopoulos N. Assessment of strain bursting in deep tunnelling by using the finite-discrete element method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 12 — 37.

22. Korchak P. A. Geomechanical prediction of growth of brittle fracture zones in the vicinity of exposed surfaces of different geometry. *Nauchnye osnovy bezopasnosti gornykh rabot. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Scientific Framework of Mining Safety: All-Russian Conference and Workshop], Moscow, IPKON RAN, 2018, pp. 150 — 156. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Корчак Павел Анатольевич — начальник
Службы прогноза и предотвращения горных ударов,
Кировский филиал АО «Апатит»,
e-mail: pkorchak@phosagro.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

P.A. Korchak, Head of the Forecast and Prevention
of Mountain Impacts Service,
Kirovsk Branch of Apatit, 184250, Kirovsk, Russia,
e-mail: pkorchak@phosagro.ru.

Получена редакцией 25.01.2019; получена после рецензии 09.01.2021; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 25.01.2019; received after the review 09.01.2021; accepted for printing 10.04.2021.