

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЛЕПОЛИМЕРНЫХ АНКЕРОВ С МАССИВОМ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

В.А. Трофимов¹, Ю.А. Филиппов¹, И.М. Загоршменный¹,
И.Л. Харитонов², Д.И. Блохин¹

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия,
e-mail: dblokhin@yandex.ru

² АО «СУЭК-Кузбасс», Ленинск-Кузнецкий, Россия

Аннотация: Проанализированы конструктивные и технологические особенности сталеполимерных анкеров, используемых для интенсификации подготовительных работ и повышения устойчивости выемочных выработок. Сделан вывод о необходимости учета в практических расчетных схемах оценки устойчивости систем «анкерная крепь – породный массив», кроме прочностных и деформационных свойств вмещающих пород, также и параметров, в не меньшей степени характеризующих эффективность анкерного крепления, а именно – несущую способность стержня анкера по материалу и прочность закрепления анкера в шпуре. Описывается построение схемы численного расчета изменения напряженно-деформированного состояния системы «анкерная крепь – породный массив», вызываемого статической нагрузкой для различных значений прочности закрепления анкера в шпуре. Представлены результаты модельного расчета, проведенного методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Для описания механизмов потери устойчивости и количественной оценки коэффициентов запаса устойчивости системы «анкерная крепь – породный массив» используется критерий разрушения Кулона-Мора. Расчет осуществлялся с использованием данных, полученных на шахте им. В.Д. Ялевского АО «СУЭК-Кузбасс». На основе результатов моделирования обоснована возможность количественной оценки несущей способности элементов анкерной крепи с неоднородным распределением прочности закрепления вдоль их длины.

Ключевые слова: горные выработки, массив горных пород, анкерная крепь, деформационно-прочностные параметры, несущая способность, качество закрепления, численные методы, ANSYS.

Для цитирования: Трофимов В. А., Филиппов Ю. А., Загоршменный И. М., Харитонов И. Л., Блохин Д. И. Моделирование взаимодействия сталеполимерных анкеров с массивом горных пород при различных условиях закрепления для оценки их несущей способности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 35–48. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_35.

Modeling interaction of rock mass and chemically anchored rock bolts to assess their load-bearing capacity in different fixation conditions

V.A. Trofimov¹, Yu.A. Filippov¹, I.M. Zakorshmenniy¹, I.L. Kharitonov², D.I. Blokhin¹

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: dblokhin@yandex.ru

² JSK «SUEK-Kuzbass», Leninsk-Kuzneckiy, Russia

Abstract: The article discusses structural and operational characteristics of chemically anchored rock bolts used to improve stability of underground excavations and to intensify primary mining. It is concluded that practical modeling of the rock bolt–rock mass system stability should include the strength and deformation characteristics of rocks, as well as the other attributes of the rockbolting efficiency, namely, the load-bearing capacity of the rock bolt rod material and the rock bolt anchorage strength. The article describes the stress–strain analysis of the rock bolt–rock mass system under static loading at different values of the rock bolt anchorage strength in a borehole. The results of the finite-element model analysis implemented in ANSYS are presented. The mechanism of the strength loss and the quantification of the stability factor in the rock bolt–rock mass system are described using the Mohr–Coulomb failure criterion. The calculations used the data from Yalovsky Mine of SUEK-Kuzbass. Based on the modeling results, it is proved to be feasible to quantify load-bearing capacity of rock bolt elements at the nonuniform anchorage strength distribution along their length.

Key words: underground excavations, rock mass, rockbolting, strength and deformation characteristics, load-bearing capacity, anchorage strength, numerical methods, ANSYS.

For citation: Trofimov V. A., Filippov Yu. A., Zakorshmenniy I. M., Kharitonov I. L., Blokhin D. I. Modeling interaction of rock mass and chemically anchored rock bolts to assess their load-bearing capacity in different fixation conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):35-48. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_35.

Введение

Технологичность и высокий уровень механизации анкерного крепления горных выработок в современных условиях интенсификации подземной угледобычи, несомненно, позволяют выдерживать ритмичность проходческих и очистных работ, а также обеспечивать своевременность навески конструкций подвесных монорельсовых дорог [1–3]. Однако широко применяемые в России в настоящее время сталеполимерные анкеры типа АСП, А20В, А20 вследствие своих конструктивных особенностей не обеспечивают качественное перемешивание полимерного композита в шпуре при установке анкера и, соответственно, рав-

номерное заполнение его объема полимером [4].

Указанное обстоятельство приводит к снижению значений фактической прочности закрепления анкера в шпуре по сравнению с расчетными величинами, что не позволяет обеспечить проектную несущую способность элемента крепи и, соответственно, устойчивость выработок или конструкций подвесных монорельсовых дорог [5, 6].

Тем самым подтверждается необходимость разработки расчетных моделей, позволяющих производить количественную оценку параметров элементов анкерной крепи, обеспечивающих ее работоспособность.

В настоящее время отсутствуют эффективные аналитические подходы, позволяющие с высокой степенью достоверности осуществлять расчет параметров анкерной крепи для реальных условий горных выработок. Поэтому для решения многих задач прикладной геомеханики, в том числе и для выполнения расчетов анкерной крепи горных выработок, эффективно используются подходы численного моделирования с учетом возможно более широкого набора влияющих параметров [7 – 9]. Одним из общепринятых подходов уже давно являются методы численного моделирования, основанные на использовании нелинейных моделей механики сплошных сред [10 – 14]. В частности, указанные подходы реализованы в программном комплексе ANSYS [15, 16].

В настоящей работе с использованием средств ANSYS визуализируется и анализируется картина пространственного изменения напряженно-деформированного состояния системы «анкерная крепь – породный массив» с целью получения количественной оценки характера потери ее устойчивости в результате передачи значительной статической нагрузки на анкеры.

Конструкционные особенности системы «анкерная крепь – породный массив», прочностные и деформационные расчетные параметры элементов анкерной крепи и полимерного закрепителя, а также геомеханические свойства вмещающих пород задаются исходя из данных, полученных на шахте им. В.Д. Ялевского АО «СУЭК-Кузбасс», и описываются ниже.

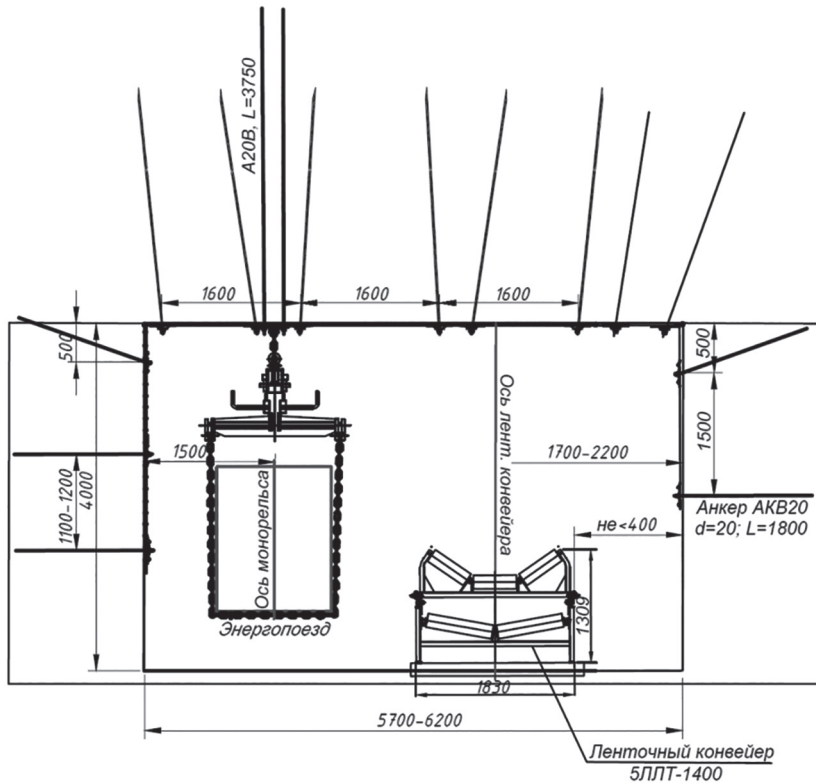


Рис. 1. Компонировочная схема анкерной подвески монорельса

Fig. 1. Layout diagram of the monorail anchor suspension

Постановка задачи

Рассмотрим задачу о статическом нагружении анкера, закрепленного в массиве горных пород посредством полимерного закрепителя. Приложенные нагрузки имитируют воздействие от секции монорельсовой дороги с подвешенным к ней грузом (дизелевоз, специализированные контейнеры, вагонетки для перевозки людей и т.д.). Схема рассматриваемой задачи приведена на рис. 1.

На рис. 2 отображена упрощенная постановка задачи для расчета поведения пары несущих анкеров, поддерживающих монорельсовую дорогу. При этом



Рис. 2. Постановка задачи для определения нагруженности анкеров

Fig. 2. Statement of the problem for determining loading of anchors

Деформационно-прочностные характеристики различных компонентов системы «анкерная крепь — породный массив»

Strength and deformation characteristics of different components in rock bolt–rock mass system

| | Плотность, ρ , кг/м ³ | Модуль упругости, E, ГПа | Коэффициент Пуассона, ν | Предел прочно- сти на растяже- ние, σ_r , МПа | Предел прочно- сти на сжатие, σ_c , МПа |
|---------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|--|--|
| Анкер | 7850 | 200 | 0,3 | 460 | 460 |
| Полимерный закрепитель | 3200 | 300 | 0,2 | 0,2–10 | 0,2–10 |
| Массив | 2500 | 100 | 0,3 | 50 | 50 |

массив представляет собой блок породы в виде прямоугольного параллелепипеда с закрепленными границами, кроме той, которая моделирует кровлю выработки (на рисунке это нижняя поверхность, из которой выступают анкеры). Задача решается в ПК ANSYS в 3D-постановке с разбиением всей расчетной области, включая массив горных пород, полимерный закрепитель и собственно анкеры на тетраэдральные элементы, количеством 1 167 483 шт. Сетка достаточно измельчена в области, занятой полимером, и анкерах, с тем, чтобы получить достаточно детальное описание состояния всей конструкции при ее деформировании и возможном разрушении. Значения используемых в расчетах деформационно-прочностных характеристик различных компонентов системы «анкерная крепь — породный массив» представлены в таблице.

Очевидно, что при такой постановке задачи не предусмотрена оценка влияния веса транспортируемых по монорельсу конструкций на состояние пород массива в целом вокруг выработки, находящейся в поле исходных вертикальных и горизонтальных напряжений. Считается, что параметры выработки с учетом свойств массива в целом адекватны для поддержания ее в рабочем состоянии, кроме участка расположения анкеров монорельсовой дороги, где возможно локальное разрушение элементов анкерного крепления.

Отметим некоторые особенности процессов деформирования и разрушения тех или иных элементов показанной конструкции анкерной крепи. Выделим три элемента, а именно: сам анкер, вмещающий массив горных пород и часть шпура, занятая полимерным закрепителем. Каждый из них может быть разрушен, как и сам по себе, так и любое их сочетание в зависимости от прочностных свойств взаимодействующих элементов. В конструкции крепи полимерный закрепитель имеет две контактные поверхности: с анкером и с массивом горных пород. Каждый из этих контактов обладает определенными прочностными свойствами на сдвиг и может быть разрушен приложенным к анкеру воздействием.

В общем случае картина разрушения может быть достаточно сложной, когда все или часть возможных разрушений происходит одновременно. Подобного рода моделирование может быть осуществлено достаточно просто, и в результате будет получена окончательная оценка несущей способности анкера при любых сочетаниях возможных разрушений. Однако в этом случае установление каких-либо количественных закономерностей весьма затруднено из-за наличия большого числа независимых определяющих параметров. В силу этого рассмотрим некоторые «урезанные» варианты деформирования разрушения анкерного крепления, а именно, связанные с разрушением наиболее слабого звена — полимерного закрепителя. Закрепитель и по прочностным свойствам используемого материала, и по плотности и однородности заполнения шпура представляется наиболее подверженным разрушению.

Возможность реализации такого варианта накладывает определенные ограничения на значения используемых при моделировании деформационно-прочностных параметров всех элементов анкерного крепления. Они выбираются

с учетом того, что анкер не должен разрушаться при приложении заданной нагрузки, величина которой обуславливается некоторыми внешними обстоятельствами, например, весом перевозимого оборудования. Если значения нагрузки и прочностные свойства анкера не соответствуют друг другу, то разрыв последнего скорее всего произойдет в хвостовике, выступающем из кровли выработки, а не где-то внутри скважины. Там, благодаря взаимодействию анкера с закрепителем и массивом, происходит его разгрузка и уменьшается возможность разрыва. То есть в рамках рассматриваемой задачи анкер в свободном состоянии должен выдерживать усилие на растяжение в 10 т.

Что касается значений прочностных свойств породы, то они должны быть достаточно высокими, т.е. такими, чтобы при ее разрушении анкер не терял бы связь с массивом по всей линии взаимодействия из-за разрушения и вывала породы, что также может быть оценено в рамках развиваемого в статье подхода. При этом можно оценить, какими же минимальными прочностными свойствами должен обладать массив, чтобы его разрушения не произошло.

В настоящей статье исследуется влияние прочностных свойств полимерного закрепителя на состояние и поведение анкерного крепления в целом с точки зрения сохранения его работоспособности при условии, что все остальные элементы анкерного крепления не разрушаются.

Результаты и их обсуждение

Происходящие в элементах крепи деформационные процессы будем характеризовать посредством критерия разрушения Кулона-Мора, широко используемого в задачах геомеханики [17]. Аналитически он может быть выражен в виде неравенства [18]:

$$F_s(x, y) < 1, \quad (1)$$

где $F_s = \left(\frac{S_1}{\sigma_t} + \frac{S_2}{\sigma_c} \right)^{-1}$ – коэффициент запаса устойчивости; S_1, S_2 – главные напряжения; σ_t – предел прочности на растяжение, σ_c – предел прочности на сжатие. При проведении расчетов была использована прочностная модель, в которой параметры σ_t и σ_c считались равными для каждого из используемых материалов, т.е. $\sigma_t = \sigma_c = \alpha$.

Выполнение условия (1) означает, что в точке (x, y) произошло локальное разрушение материала, и произошла в той или иной степени деградация его деформационно-прочностных свойств. Если такими точками заполнена целая область массива, то вся она частично или полностью потеряла несущую способность, а при дальнейших расчетах деформационные свойства массива в такой области должны быть уменьшены. Степень уменьшения может быть определена только в результате калибровки модели с применением реально замеренных значений тех или иных деформационных параметров (скажем, смещений в характерных точках).

В соответствии с приведенной легендой (дифференциация значений коэф-

фициента запаса прочности по цветам) на рис. 3 показано распределение величины F_s на горизонтальной поверхности кровли выработки в окрестности расположения двух анкеров (дан вид снизу в вертикальном направлении). При этом сечения анкеров окрашены оранжевым цветом, а красным – сечения шпуров с полимерным закрепителем. Анализ приведенных результатов показывает, что в данном сечении закрепитель находится в разрушенном состоянии (красный цвет соответствует условию $F_s < 1$), тогда как и массив горных пород, и сами анкеры не испытывают хотя бы начального разрушения в соответствии с критерием Кулона-Мора. Из рис. 3 следует, что перечисленные элементы в соответствии с их индивидуальными прочностными свойствами далеки от разрушения.

Цифрами 1, 2, 3 отмечены точки пересечения некоторых пробных вертикальных линий, проведенных в пределах расчетной области, с кровлей выработки. Они локализованы непосредственно в анкере (линия 1), в массиве горных пород (линия 2) и в полимерном закрепителе (линия 3). Они проходят по всей длине расчетной области, захватываемой анкерами, и предназначены для де-

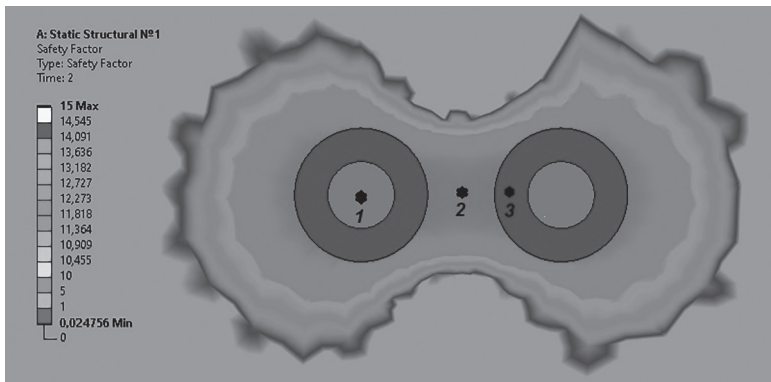


Рис. 3. Распределение коэффициента запаса устойчивости F_s на кровле выработки в зоне выхода анкеров на поверхность

Fig. 3. Distribution of coefficient of stability margin F_s on the roof of the workings in the area of anchors coming to surface

монстрации распределения различных расчетных параметров в исследуемом массиве горных пород, включающем анкеры и области, заполненные полимерным закрепителем.

В частности, на рис. 4 показано распределение коэффициента запаса устойчивости (F_s) по этим линиям от кровли выработки ($z = 2500$ мм) вглубь массива. Начало координат помещено на конце анкера, заглубленного в массив.

Рисунок демонстрирует, что кривые 1 и 2 не пересекают горизонтальную прямую, проведенную при значении критериального параметра $F_s = 1$. В то же время кривая для закрепителя (3) пересекает эту прямую при $z \approx 2000$ мм. Поскольку в рассматриваемом исследовании длина анкера принята равной 2500 мм, то это означает, что заливка получила разрушения по длине ~ 500 мм от поверхности кровли вглубь скважины. Об этом же свидетельствуют рис. 5 и 6.

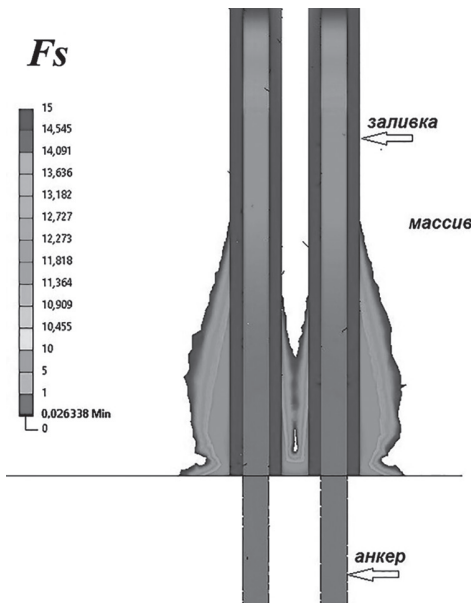


Рис. 5. Детальное распределение коэффициента запаса устойчивости F_s в зоне выхода анкеров на поверхность выработки

Fig. 5. Detailed distribution of coefficient of stability margin F_s in area of anchors exit to surface of mine

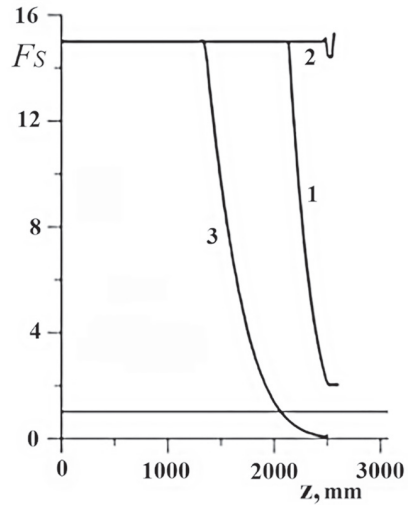


Рис. 4. Распределение коэффициента запаса устойчивости F_s в массиве горных пород по выделенным линиям: в анкере (1), в массиве (2), в полимерном закрепителе (3)

Fig. 4. Distribution of the stability margin coefficient F_s in the rock mass along the selected lines: in the anchor (1), in the array (2), in the polymer anchor (3)

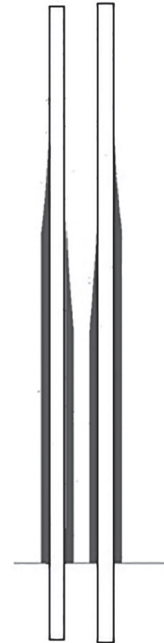


Рис. 6. Конфигурация и размеры всей зоны разрушения полимерного закрепителя

Fig. 6. Configuration and dimensions of entire destruction zone of polymer fastener

На рис. 5 представлено распределение величины F_s в плоскости вертикального сечения, проходящего через оси анкеров. При этом распределение нарушенности материалов в зоне анкерного крепления, показанное на рис. 5 красным цветом, соответствует рис. 3. На рис. 6 практически в том же линейном масштабе показана только зона разрушения и ее протяженность вдоль анкера от поверхности выработки вдоль шпура. Она имеет ограниченное распространение, в то время как остальная часть объема, занятого полимерным закрепителем, сохраняет сплошность и прочностные свойства на протяжении 2000 мм, обеспечивая таким образом работоспособность анкеров.

При выбранных значениях прочностных параметров для материала массива горных пород он также не подвержен разрушению, хотя для менее прочного материала возможно появление вывалов из кровли. Отметим, что в приведенной постановке задачи не предусмотрено моделирование предварительной натяжки

анкера с использованием соответствующей шайбы [19, 20].

Представляет интерес оценка влияния прочностных свойств материала полимерного закрепителя на размеры зоны его разрушения в шпуре при заданной постоянной нагрузке на анкеры. На рис. 7 показано распределение величины F_s по длине шпура для пяти различных значений величины прочности α , изменяющейся в пределах 0,2–10 МПа (кривые 1–5 соответственно). Точки пересечения этих кривых с горизонтальной прямой при $F_s = 1$ определяют протяженность зон разрушения в каждом из рассмотренных случаев.

График на рис. 8 является обобщением полученных результатов. На нем показана зависимость протяженности зоны разрушения от прочностного параметра α материала закрепителя. Точки — это результаты, полученные из анализа рис. 7 (пять точек для пяти кривых). Сплошная линия — это наилучшая аппроксимация полученных точек функцией степенного вида:

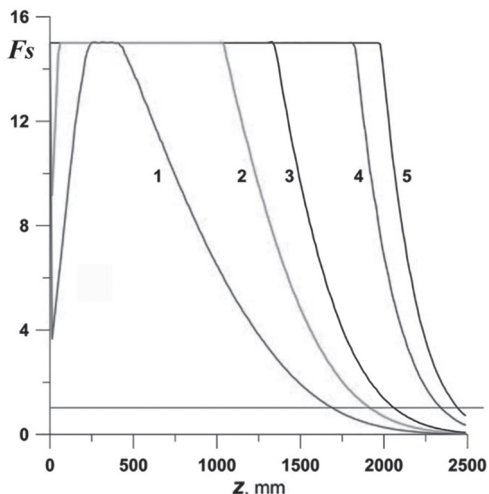


Рис. 7. Распределение коэффициента запаса устойчивости в закрепителе для различных значений его прочности

Fig. 7. Distribution of the coefficient of stability margin in the fastener for different values of its strength

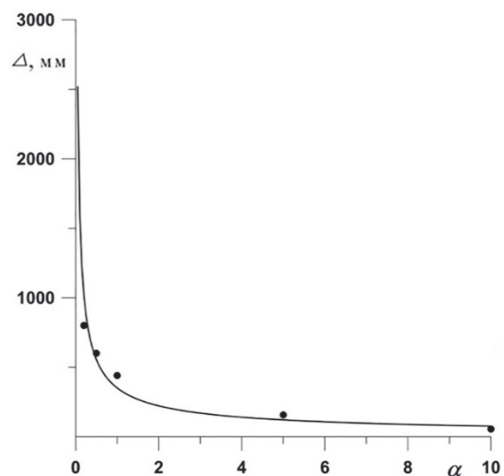


Рис. 8. Протяженность зоны разрушения для различных значений прочности закрепителя

Fig. 8. The extent of the fracture zone for different values of the strength of the fastener

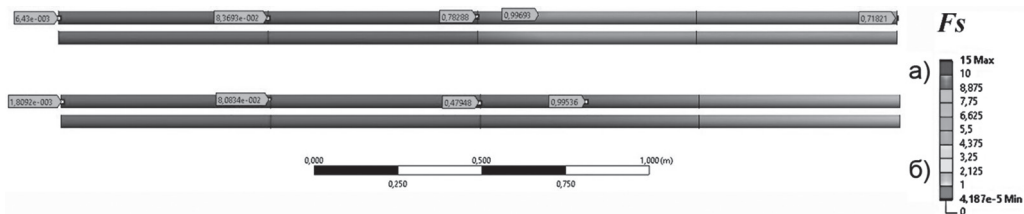


Рис. 9. Сопоставление протяженности зоны начальных разрушений в полимерном закрепителе с окончательной зоной разрушения

Fig. 9. Comparison of the length of zone of initial destruction in polymer fixer with the final zone of destruction

$$\Delta = \frac{350}{\alpha^{0,66}} \quad (2)$$

Рис. 8 демонстрирует, что при малых значениях прочности может произойти разрушение закрепителя по всей длине шпура с выпадением анкера.

Напомним, что все приведенные количественные данные получены при заданной фиксированной нагрузке на анкера — по 10 т. Очевидно, что приложение большей нагрузки потребует перерасчета всех параметров в соответствии с приведенным алгоритмом.

Далее отметим следующее важное обстоятельство. Использование любого критерия прочности (в том числе и Кулона-Мора) для оценки размеров и расположения зон разрушения в той или иной горнотехнической конструкции имеет ту особенность, что его однократное применение позволяет определить только так называемую зону начального разрушения. Использование критерия подразумевает модификацию в той или иной степени свойств пород в зоне разрушения, в результате чего формируется расчетная область с новыми деформационными свойствами, для которой может быть повторно решена исходная задача с прежними граничными условиями. И вновь применен критерий прочности к новым значениям параметров напряженно-деформированного состояния. Такая процедура может повторяться неоднократно, в результате чего сформируется окончательная область

разрушения исходной горнотехнической конструкции. Количество таких итераций заранее не может быть каким-либо образом оценено. Их может быть незначительное количество, и тогда можно говорить об устойчивом процессе разрушения, когда он завершается на некотором шаге. Однако возможна ситуация, когда итерационный процесс не завершается и приводит к полному разрушению всей конструкции. В этом случае разрушение, начавшись при какой-то нагрузке, уже не останавливается до полного разрушения конструкции. Это неустойчивое разрушение.

На рис. 9 приведено сравнение зоны начального разрушения (а) и зоны полного разрушения (б), показанных красным цветом, для которых коэффициент запаса устойчивости F_s меньше единицы. Зоны приурочены к участку анкера, примыкающего к кровле выработки (на рисунке слева). При этом значение параметра прочности для полимерного закрепителя α было принято равным 1 МПа. Для получения полной зоны разрушения было выполнено 5 дополнительных итераций после формирования зоны начальных разрушений. При этом граница разрушения продвинулась не более чем на 0,3 м. Таким образом, горнотехническая конструкция анкерного крепления в рассматриваемой ситуации оказалась устойчивой к описанному нагружению анкеров. Несмотря на то, что произошло разрушение закрепителя на протяжении более половины длины ан-

кера, вся конструкция сохранила работоспособность по фактору разрушения полимерного материала и по-прежнему способна выдержать 20-тонную нагрузку.

Очевидно, что возможна ситуация, когда такое продвижение составит большую величину, скажем, 1,5 м, и тогда разрушение материала закрепителя охватит всю протяженность анкера и он потеряет несущую способность и будет выдернут из шпура. Такая ситуация может быть связана с характером разрушения полимерного материала и соответствующим уменьшением его модуля деформирования. При этом реализуется динамический режим разрушения. Однако значения всех определяющих параметров, принятых в данном исследовании, обеспечивают работоспособность рассматриваемого анкерного крепления.

Рассмотрим далее распределение нормальных напряжений внутри объема с полимерным закрепителем и анкера по прямым 1 и 3 (см. рис. 3), действующих параллельной оси анкера.

На рис. 10 и 11 приведено сравнение напряжений в упомянутых элементах

анкерного крепления при отсутствии (2) разрушения полимерного закрепителя и с его учетом (1). Полученные напряжения, как и следовало ожидать, являются растягивающими. Ввиду того, что используемый полимерный материал в значительной степени более податлив, чем материал анкера, напряжения в нем на порядок меньше напряжений в анкере.

Рис. 10 подтверждает фактически очевидное положение механики сплошной среды в конкретном случае: при разрушении полимерного материала его модуль упругости уменьшается в определенной мере, а деформация остается практически неизменной, в связи с чем растягивающие напряжения падают в соответствии с уменьшением модуля упругости.

Отметим, что площадь поперечного сечения стержня анкера ($r = 10$ мм) составляет $3,14 \cdot 10^{-4}$ м², что при нагрузке в 10 т обеспечивает растягивающее напряжение в 314 МПа. Эта величина реализуется в части анкера, выступающей из кровли выработки, как это и отражено на рис. 11. При этом разрушение за-

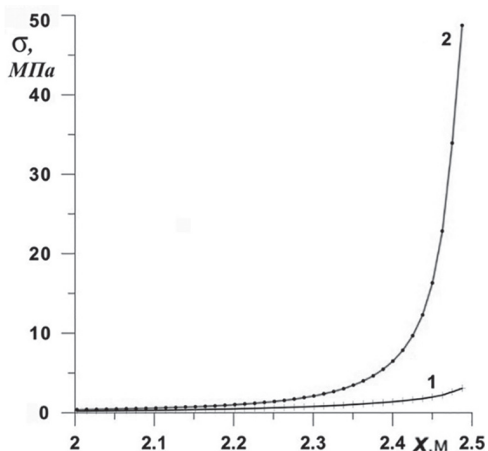


Рис. 10. Сопоставление продольных напряжений в полимерном закрепителе с учетом его разрушения (1) и без учета (2)

Fig. 10. Comparison of longitudinal stresses in a polymer fastener taking into account its destruction (1) and without taking into account (2)

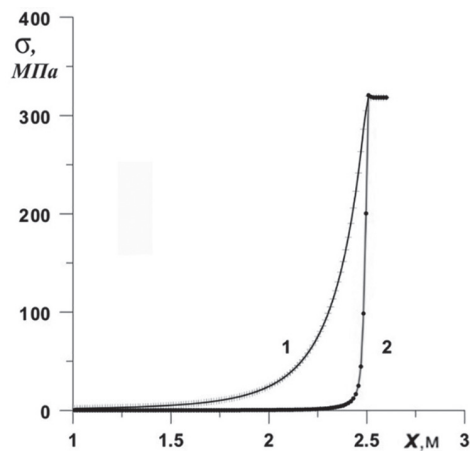


Рис. 11. Сопоставление продольных напряжений в анкере с учетом разрушения полимерного закрепителя (1) и без учета (2)

Fig. 11. Comparison of longitudinal stresses in anchor taking into account the destruction of polymer fastener (1) and without taking into account (2)

ливки никоим образом не влияет на эту величину. Кроме того, значительная часть анкера, как в случае разрушения закрепителя, так и при его отсутствии, оказывается ненагруженной растягивающими напряжениями. Ввиду полного контакта между анкером и закрепителем и между закрепителем и массивом горных пород нагрузка передается в конечном итоге на массив, практически полностью разгружая анкер. Разрушение закрепителя ослабляет этот контакт вблизи кровли выработки, что приводит к частичному нагружению анкера на протяжении 1,5 м (от 1 до 2,5 м), что и отражено на рис. 11. Заметим, что оставшийся ненарушенным контакт в глубине массива протяженностью в 1 м фактически обеспечивает несущую способность анкера.

Заключение

В статье рассмотрены некоторые аспекты влияния полимерного закрепителя, фиксирующего анкер в шпуре, на геомеханическое состояние и поведение всей горнотехнической конструкции анкерного крепления. При этом приняты определенные ограничения, с тем чтобы выделить особенности, вносимые деформационными и прочностными свойствами материала закрепителя. Пока-

зано, что при определенных условиях, то есть при малых значениях прочностных параметров, полимерный закрепитель может разрушиться по всей длине анкера, что может привести к его выпадению из шпура. Однако сохранение материала закрепителя в ненарушенном состоянии даже на некоторой малой части протяженности анкера может обеспечить работоспособность последнего. При этом существует минимальное значение такой длины, при достижении которого дальнейшее разрушение принимает динамический характер.

Отметим, что характер деформирования и разрушения анкерного крепления в значительной степени зависит от прочностных свойств контактов в этом креплении. Ввиду того что поверхность анкера, как правило, весьма шероховата и содержит искусственные неровности, препятствующие его выдергиванию, этот контакт анкер–закрепитель можно считать практически не подверженным разрушению. На контакте закрепитель–массив также можно считать проскальзывание маловероятным, учитывая шероховатость поверхности при бурении шпуров. В этом случае разрушение фактически идет по закрепителю, как это и рассмотрено в статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубов В. П.* Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 77–83. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.16.
2. *Дудин А. А., Вахрушев Е. В., Злобин С. Е., Прокофьев А. С., Пайкин Д. И., Лысенко М. В.* Обоснование возможности применения анкерной крепи горных выработок в условиях обводненных и ослабленных пород // Уголь. — 2018. — № 12(1113). — С. 21–26. — DOI: 10.18796/0041-5790-2018-12-21-25.
3. *Качурин Н. М., Ногих В. Р.* Взаимодействие подвесных транспортных устройств с породами и обеспечение безопасности и устойчивости горных выработок // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2015. — № 4. — С. 65–75.
4. *Янак А. С.* Проблема анкерного крепления горных выработок угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2005. — № 3. — С. 96–97.
5. *Уварова В. А., Кострыкин А. П., Копытин В. А.* Контроль прочностных параметров сталеполимерного анкерного крепления горных пород // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 9. — С. 14–18. — DOI: 10.24000/0409-2961-2017-9-14-18.

6. Yokota Y., Zhao Z., Shang J., Nie W., Date K., Iwano K., Okada Y. Effect of bolt configuration on the interface behaviour between a rock bolt and bond material. A comprehensive DDA investigation // *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 105, pp. 116–128. DOI: 10.1016/j.co.2018.09.017.

7. Lisjak A., Young-Schultz T., Li B., He L., Tatone B. S. A., Mahabadi M. A novel rock-bolt formulation for a GPU-accelerated, finite-discrete element method code and its application to underground excavations // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 134, article 104410. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104410.

8. Блохин Д. И., Загоршменный И. М., Кубрин С. С., Харитонов И. Л., Холмянский М. Л. Моделирование взаимодействия анкерной крепи подвесной монорельсовой дороги с массивом горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 9. — С. 25–39. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-25-39.

9. Cui L., Dong Y., Sheng Q., Shen Q. New numerical procedures for fully-grouted bolt in the rock mass with slip and non-slip cases at the rock-bolt interface // *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 204, pp. 849–863. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.219.

10. Степанов Ю. А. Адаптация и развитие метода конечных элементов для расчета параметров напряженно-деформированного состояния угленосного массива // *Вестник КузГТУ*. — 2011. — № 4. — С. 31–34.

11. Власов А. Н., Волков-Богородский Д. Б., Знаменский В. В., Мнушкин М. Г. Конечно-элементное моделирование задач геомеханики и геофизики // *Вестник МГСУ*. — 2012. — № 2. — С. 52–65.

12. Brinkgreve R. B. J., Bakker H. L. Non-linear finite element analysis of safety factors // *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Cairns, Australia. 1991, pp. 1117–1122.

13. Господариков А. П. Разработка нелинейных математических моделей и численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород // *Записки Горного института*. — 2016. — Т. 219. — С. 382–386.

14. Sas I. E., Cherepetskaya E. B., Pavlov I. A. Solving problems in geomechanics: Comparison of the Fidesys strength analysis system and the Plaxis software package // *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 755, pp. 328–332. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEY.755.328.

15. Трофимов В. А., Кубрин С. С., Филиппов Ю. А., Харитонов И. Л. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и пологого мощного угольного пласта при завершении отработки выемочного столба // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2019. — № 8. — С. 42–56. — DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-42-56.

16. Захаров В. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А. Численное моделирование анкерного крепления контура выработки при реологическом деформировании пород // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2021. — № 6. — С. 6–17. — DOI: 10.15372/FTPRPI20210601.

17. Мирный А. Ю., Тер-Мартirosян А. З. Область применения современных механических моделей грунтов // *Геотехника*. — 2017. — № 1. — С. 20–26.

18. Juvinall R. C. *Engineering Considerations of stress, strain, and strength*. New York: McGraw-Hill, 1967. 580 p.

19. Cao J. C., Zhang N., Wang S. Y., Qian D. Y., Xie Z. Z. Physical model test study on support of super pre-stressed anchor in the mining engineering // *Engineering Failure Analysis*. 2020, vol. 118, article 104833. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104833.

20. Chang J., He K., Pang D., Li D., Li C., Sun B. Influence of anchorage length and pretension on the working resistance of rock bolt based on its tensile characteristics // *International Journal of Coal Science & Technology*. 2021, vol. 8, no. 6, pp. 1384–1399. DOI: 10.1007/s40789-021-00459-9. **PLoS**

REFERENCES

1. Zubov V. P. Applied technologies and current problems of resource-saving in underground mining of stratified deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 6, pp. 77 – 83. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.16.
2. Dudin A. A., Vakhrushev E. V., Zlobin S. E., Prokofiev A. S., Paikin D. I., Lysenko M. V. Substantiation of the possibility of using mine working roof bolting in conditions of watered and weakened rocks. *Ugol'*. 2018, no. 12(1113), pp. 21 – 26. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-12-21-25.
3. Kachurin N. M., Nogih V. R. Interaction underslung transport units with rocks and providing safety and stability of mining workings. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2015, no. 4, pp. 65 – 75. [In Russ].
4. Yanak A. S. The problem of anchoring the mine workings of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2005, no. 3, pp. 96 – 97. [In Russ].
5. Uvarova V. A., Kostykin A. P., Kopytin V. A. Control of strength parameters of steel polymer anchoring of rocks. *Occupational Safety in Industry*. 2017, no. 9, pp. 14 – 18. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-9-14-18.
6. Yokota Y., Zhao Z., Shang J., Nie W., Date K., Iwano K., Okada Y. Effect of bolt configuration on the interface behaviour between a rock bolt and bond material. A comprehensive DDA investigation. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 105, pp. 116 – 128. DOI: 10.1016/j.co.2018.09.017.
7. Lisjak A., Young-Schultz T., Li B., He L., Tatone B. S. A., Mahabadi M. A novel rockbolt formulation for a GPU-accelerated, finite-discrete element method code and its application to underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 134, article 104410. DOI: 10.1016/j.ijrmm.2020.104410.
8. Blokhin D. I., Zakorshmenyi I. M., Kubrin S. S., Kharitonov I. L., Kholmyansky M. L. Modeling interaction of suspended monorail rock bolt support and rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 25 – 39. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-25-39.
9. Cui L., Dong Y., Sheng Q., Shen Q. New numerical procedures for fully-grouted bolt in the rock mass with slip and non-slip cases at the rock-bolt interface. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 204, pp. 849 – 863. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.219.
10. Stepanov Ya. A. Adaptation and development of the finite element method for calculating the parameters of the stress-strain state of a coal rock mass. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2011, no. 4, pp. 31 – 34. [In Russ].
11. Vlasov A. N., Volkov-Bogorodsky D. B., Znamensky V. V., Mnushkin M. G. Finite element modeling of geomechanics and geophysics problems. *Vestnik MGSU*. 2012, no. 2, pp. 52 – 65.
12. Brinkgreve R. B. J., Bakker H. L. Non-linear finite element analysis of safety factors. *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Cairns, Australia. 1991, pp. 1117 – 1122.
13. Gospodarikov A. P. Nonlinear math model development and numerical model of strain deformed rock mass conditions prognosis. *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 219, pp. 382 – 386. [In Russ].
14. Sas I. E., Cherepetskaya E. B., Pavlov I. A. Solving problems in geomechanics: Comparison of the Fidesys strength analysis system and the Plaxis software package. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 755, pp. 328 – 332. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.328.
15. Trofimov V. A., Kubrin S. S., Filippov Yu. A., Kharitonov I. L. Numerical modeling of stress-strain state for host rock mass and thick gently dipping coal seam after mining completion in extraction panel. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 42 – 56. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-42-56.
16. Zakharov V. N., Trofimov V. A., Filippov Y. A. Numerical modeling of rock bolt support in case of rheological behavior of rock mass in deformation. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2021, no. 6, pp. 6 – 17. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRI20210601.
17. Mirnyy A. Y., Ter-Martirosyan A. Z. Scope of application of modern mechanical models of soils. *Geotekhnika*. 2017, no. 1, pp. 20 – 26. [In Russ].

18. Juvinall R. C. *Engineering Considerations of stress, strain, and strength*. New York: McGraw-Hill, 1967. 580 p.

19. Cao J. C., Zhang N., Wang S. Y., Qian D. Y., Xie Z. Z. Physical model test study on support of super pre-stressed anchor in the mining engineering. *Engineering Failure Analysis*. 2020, vol. 118, article 104833. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104833.

20. Chang J., He K., Pang D., Li D., Li C., Sun B. Influence of anchorage length and pretension on the working resistance of rock bolt based on its tensile characteristics. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2021, vol. 8, no. 6, pp. 1384–1399. DOI: 10.1007/s40789-021-00459-9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трофимов Виталий Александрович¹ — д-р техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: asas_2001@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9010-189X,

Филиппов Юрий Алексеевич¹ — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: filippov.yury@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-3347-677X,

Закоршменный Иосиф Михайлович¹ — д-р техн. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: iosif-54@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9153-673X,

Харитонов Игорь Леонидович — канд. техн. наук,
заместитель технического директора,
АО «СУЭК-Кузбасс», e-mail: kharitonovil@suek.ru,

Блохин Дмитрий Иванович¹ — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: dblokhin@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4652-661X,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

Для контактов: Блохин Д.И., e-mail: dblokhin@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Trofimov¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,
e-mail: asas_2001@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9010-189X,

Yu.A. Filippov¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: filippov.yury@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0003-3347-677X,

I.M. Zakorshmennyi¹, Dr. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: iosif-54@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9153-673X,

I.L. Kharitonov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Technical Director,
JSK «SUEK-Kuzbass», 652507, Leninsk-Kuzneckiy,
Russia, e-mail: kharitonovil@suek.ru,

D.I. Blokhin¹, Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, e-mail: dblokhin@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-4652-661X,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
111020, Moscow, Russia.

Corresponding author: D.I. Blokhin, e-mail: dblokhin@yandex.ru.

Получена редакцией 03.07.2022; получена после рецензии 05.10.2022; принята к печати 10.12.2022.

Received by the editors 03.07.2022; received after the review 05.10.2022; accepted for printing 10.12.2022.