

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ПОРОД ВЗРЫВОМ, РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-5-14

УДК 622

ПРОГНОЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОЙ НАБРЫЗГБЕТОННОЙ КРЕПИ В ТРЕЩИНОВАТЫХ МАССИВАХ

Протосеня Анатолий Григорьевич,
доктор технических наук, профессор, e-mail: kaf-sgp@mail.ru
Вильнер Мария Александровна,
аспирант, e-mail: mary.vilner@gmail.com

Санкт-Петербургский горный университет,
199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2



Информация о статье

Поступила:
15 сентября 2021 г.

Рецензирование:
30 сентября 2021 г.

Принята к печати:
25 октября 2021 г.

Ключевые слова:

напряженно-деформированное состояние, трещиноватый массив, апатит-нефелиновое месторождение, крепь горной выработки, набрызгбетон, дисперсно-армированный бетон, модель пластического поведения бетона, численное моделирование.

Аннотация.

Поддержание устойчивости горных выработок является приоритетным направлением в работе горного предприятия. Со временем возникает необходимость обрабатывать запасы полезных ископаемых во все более сложных горно-геологических условиях. В качестве частного случая можно рассматривать сильнотрещиноватый породный массив. Наиболее неблагоприятным случаем нагружения крепи является отделение горной массы в своде или боках выработки, при этом нагрузка от всего веса отделившейся породы приходится на крепь. Кроме того, при таком характере нагружения часть крепи находится в растянутом состоянии. Такие условия ведут к необходимости разработки и применения более технологичных крепей на горных предприятиях. В статье обосновывается применение дисперсно-армированной набрызгбетонной крепи взамен монолитной бетонной или неармированной набрызгбетонной. Основным преимуществом дисперсного армирования стальной или композитной фиброй является повышение прочностных характеристик бетона. Прочность на растяжение при изгибе по сравнению с неармированным набрызгбетоном отличается на 150-180 %. Изучение поведения дисперсно-армированного набрызгбетона с различными механическими характеристиками производится методами численного моделирования. Получены зависимости несущей способности крепи от характеристик бетона в различных условиях, а также проанализирована остаточная прочность. Обоснованы условия замены монолитной бетонной и неармированной набрызгбетонной крепей на дисперсно-армированную набрызгбетонную крепь.

Для цитирования: Протосеня А.Г., Вильнер М.А. Прогноз напряженно-деформированного состояния дисперсно-армированной набрызгбетонной крепи в трещиноватых массивах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 5 (147). – С. 5-14 – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-5-14

Введение. Методы крепления и поддержания горных выработок для обеспечения их устойчивости на протяжении всего периода эксплуатации должны совершенствоваться одновременно с совершенствованием технологий проходки. Причиной этого является

необходимость перевода горных работ на более глубокие горизонты, характеризующиеся более сложными горно-геологическими условиями проходки и эксплуатации [1].

В статье рассматриваются горные породы с параметрами, характерными для апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива. При увеличении глубины трещиноватость массива увеличивается, возрастает анизотропия пород, более того, меняется тектоническая составляющая напряжений; горизонтальные компоненты могут превышать вертикальные в более чем 2,5 раз [2,3]. В работе рассматривается влияние на характеристики массива только макротрещин; при этом массив может быть пересечен несколькими системами трещин. Размер блоков – отдельностей, возникающих в таком случае, для Хибинского массива может варьироваться от 0,1x0,2 до 1x2 м.

При строительстве выработки в сильнотрещиноватом породном массиве может возникнуть самый неблагоприятный случай нагружения крепи – отделение горной массы в своде или боках выработки от массива по поверхностям ослабления в пределах свода естественного обрушения. В таком случае нагрузка на крепь определяется весом отделившейся горной массы. Важнейшим условием является правильный расчет несущей способности крепи, либо подбор такого типа крепи, который не допустит вывалообразования в своде и боках выработки [4].

Первый случай относится к использованию рамной или монолитной бетонной крепи, которые достаточно часто принимаются на участках одиночных выработок и сопряжениях [5,6] согласно типовым паспортам крепления. Такие крепи обладают технологическими недостатками – низкой механизацией работ, их применение приводит к перерасходу материалов, так как при аналогичных условиях толщина крепи из неармированного бетона должна быть выше.

Более технологичной крепью является набрызгбетонная [7,8]. Ее дополнительное преимущество – возможность частичного проникновения бетона в трещины приконтурной зоны и ее упрочнение. Набрызгбетон, наносимый на породный контур, имеет с ним полный контакт по всей поверхности выработки и образует вместе с породами единую деформируемую систему. Несущая способность крепи может быть увеличена за счет уменьшения амплитуды неровностей контура выработки, что достигается путем применения гладкоконтурного взрывания и предварительным выравниванием контура выработки слоем набрызгбетона.

Основной недостаток набрызгбетонной крепи в том, что бетон является хрупким материалом и плохо сопротивляется растягивающим напряжениям, что особенно важно при давлении на крепь отделившейся горной массы.

Для повышения эффективности работы бетона его армируют стальными или синтетическими волокнами – фиброй [9,10,11]. На основании обзора технической литературы и научных публикаций [12,13,14] выявлено, что прочность на сжатие дисперсно-армированного бетона может возрасти до 20 % при дозировке на 1 м³ бетонной смеси 30-40 кг стальной фибры, или 6-7 кг синтетической фибры (стандартная дозировка). Прочность на растяжение при изгибе по сравнению с неармированным бетоном может возрасти до 150-180 % [15].

В статье поведение дисперсно-армированной набрызгбетонной крепи изучено при различных параметрах армирования и горно-геологических условиях. Численное моделирование выполнено в программном комплексе Simulia Abaqus [16].

Определение расчетной нагрузки на крепь. Для массивов вмещающих горных пород на апатит-нефелиновых месторождениях характерны параметры прочности и трещиноватости, варьирующиеся в широких пределах [18]. Исходя из этих параметров, массиву назначаются категории состояния, описанные в регламентирующих документах эксплуатирующего предприятия и научной литературе [19]. Каждая категория характеризуется определенными геомеханическими процессами и соответствующей ожидаемой устойчивостью породного контура.

Статистическая обработка паспортов крепления показывает, что наиболее часто на рудниках встречаются категории состояния «Б» и «Д». Категория состояния «Д» относится к перенапряженным массивам горных пород, для которых возможны динамические проявления горного давления. Для категории состояния «Б» характерно напряженное состояние, которое можно выразить соотношением:

$$\sigma_d \leq 0,3\sigma_c,$$

где σ_d – действующее максимальное напряжение в массиве; σ_c – предел прочности пород на сжатие.

При таком напряженном состоянии массив сохраняет устойчивость, разрушаясь только в сильнотрещиноватых породах с интенсивностью трещиноватости более 10 шт/м. Могут наблюдаться как локальные вывалы по трещинам, так и сплошные по всей ширине или длине выработки.

В пределах месторождений Хибинского массива выделяется четыре основных системы трещин. Системы трещин формируют блочную структуру массива, со средними объемами блоков от 0,1x0,1x0,2 м до 1x1x2 м. Трещины характеризуются значительной шероховатостью контакта. При сухой поверхности контакта угол трения по контакту составляет 31,5°, среднее значение сцепления составляет 8 МПа.

Таблица 1. Физико-механические свойства ийолит-уртитов

Table 1. Physical and mechanical properties of iyolite-urtites

Удельный вес, МН/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости в массиве, МПа	Коэффициент Пуассона в массиве
0,028	132	37	41	59500	0,23	15240	0,32

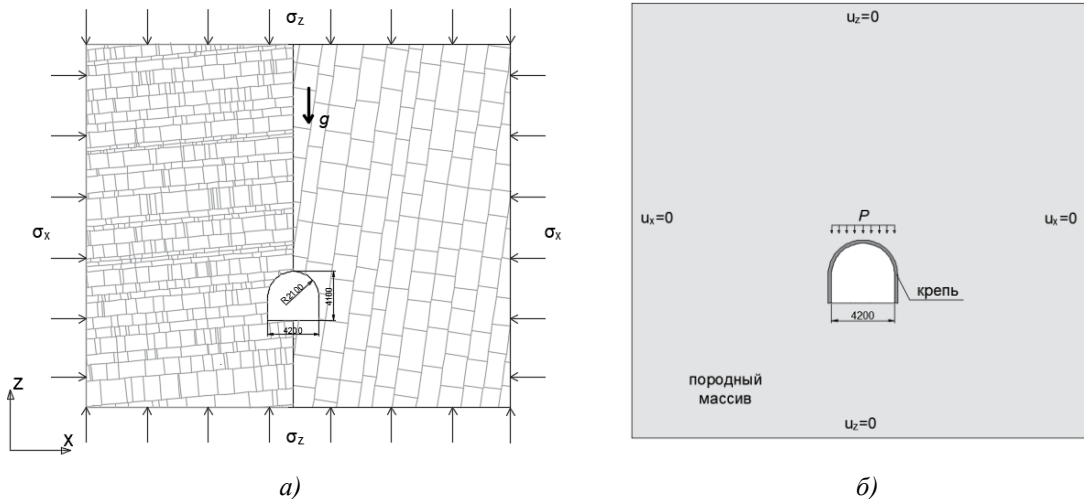


Рис. 1. Расчетная схема для определения НДС вокруг выработки, расположенной в трещиноватом массиве (а) и расчетная схема для определения несущей способности крепи (б)

Fig. 1. Calculation scheme for determining the VAT around the workings located in the fractured array (a) and calculation scheme for determining the bearing capacity of the support (b)

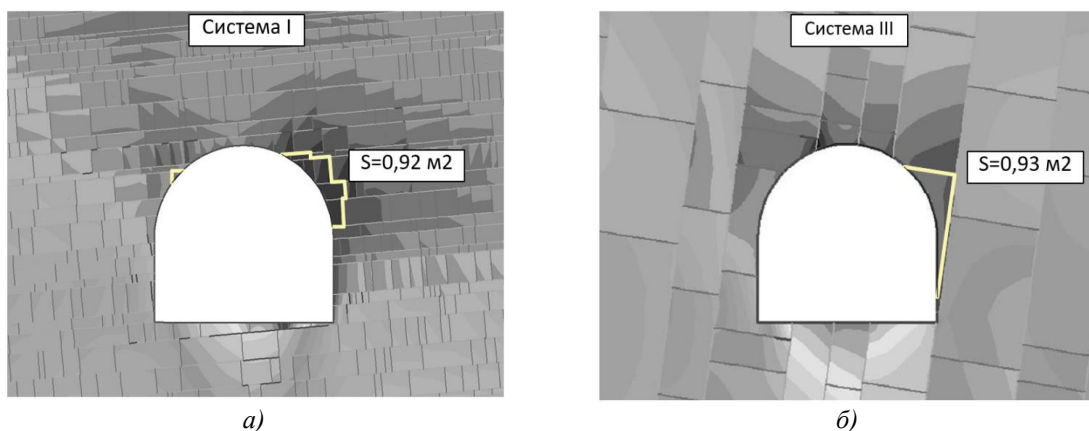


Рис. 2. Прогноз вертикальных смещений в окрестности выработки вне зоны влияния очистных работ (а) для системы I, (б) для системы III

Fig. 2. Forecast of vertical displacements in the vicinity of the workings outside the zone of influence of cleaning works (a) for system I, (b) for system III

Таблица 2. Механические характеристики и параметры модели пластического течения нермированного бетона и дисперсно-армированного бетона
Table 2. Mechanical characteristics and parameters of the plastic flow model of non-reinforced concrete and dispersed reinforced concrete

Тип бетона	неармированный бетон	дисперсно-армированный бетон
Модуль упругости бетона E_c , ГПа	30	30
Коэффициент Пуассона ν	0,2	0,2
Призменная прочность бетона при одноосном сжатии f_{cm} , МПа	25,7	28,7
Прочность бетона при одноосном растяжении f_{ctm} , МПа	3,8	5,0
Коэффициент дилатансии бетона Ψ	30	30
Коэффициент, характеризующий отношение прочности бетона при двухосном сжатии к прочности бетона на одноосное сжатие α_f	1,16	1,14
Параметр пластического потенциала α_y	0,1	0,1
Коэффициент формы поверхности пластического течения K_c	0,667	0,667

Физико-механические свойства вмещающих пород, ийолит-уртитов, принятые при моделировании, сведены в таблицу 1.

Изучение поведения набрызгбетонной крепи производится для условий массива с системами трещин с наибольшей и с наименьшей интенсивностью (системы трещин I и III соответственно). Напряженное состояние при этом характеризуется как тектоническое с превышением величин горизонтальных компонент над вертикальными. Максимальное действующее напряжение составляет $\sigma_y = 30,1$ МПа.; наименьшая горизонтальная компонента равна $\sigma_x = 22,5$ МПа; вертикальная $\sigma_z = 16,5$ МПа. Выработка имеет сводчатое сечение с радиусом свода 2,1 м; высота стенки до пяты свода составляет 2,0 м; высота от почвы до шельги свода – 4,1 м; ширина – 4,2 м.

Расчетная схема приведена на рисунке 1, а; полученные размеры вывалов горной массы приведены на рисунке 2.

На основании полученных данных расчетный вес отделившейся горной массы на 1 пог.м выработки составит вне зоны влияния очистных работ: для системы I $P_I = 25,7$ кН и для системы III $P_{III} = 26,04$ кН; в зоне влияния очистных работ: для системы I $P_I = 38,5$ кН и для системы III $P_{III} = 39,0$ кН.

Определение несущей способности крепи. В качестве модели, описывающей поведение набрызгбетонного покрытия под нагрузкой, выбрана модель пластического поведения бетона с накоплением повреждений (concrete damage plasticity model) [20,21,22]. Модель предназначена для описания механического поведения бетона при всех напряженных состояниях при незначительных величинах бокового обжатия.

Механическое поведение бетона при сжатии и растяжении в принятой модели описывается как изотропное упругое в комбинации с изотропным пластическим, что позволяет описать необратимые деформации в процессе трещинообразования и разрушения при монотонном или динамическом характере нагружения. Основными механизмами разрушения являются образование трещин отрыва и пластическое разрушение при сжатии. Модель позволяет учитывать армирование бетона отдельными стержнями, сетками и дисперсное армирование. Дисперсное армирование бетона задается через величину энергии, необходимой для образования и полного раскрытия трещины.

Механические свойства бетонов (таблица 2) приняты по результатам лабораторных испытаний, проведенных Санкт-Петербургским горным университетом, а также в ходе исследования по определению полной диаграммы деформирования бетона при одноосном

Таблица 3 – Относительная несущая способность крепи горной выработки для категории состояния «Б»

Table 3 - Relative load-bearing capacity of the mining support for the condition category

Толщина крепи, см	Отн. площадь контакта в своде	Коэффициент относительной несущей способности крепи k_r			
		Неармированный		Дисперсно-армированный н/б	
		Вне зоны влияния очистных работ	В зоне влияния очистных работ	Вне зоны влияния очистных работ	В зоне влияния очистных работ
10	0	-	-	1,351	-
	0,188	5,864	4,697	9,027	5,758
	0,376	48,07	31,299	49,118	31,330
	0,688	48,967	31,871	50,02	31,905
	1	48,968	31,872	50,02	31,905
15	0	2,845	1,97	4,058	2,588
	0,188	30,033	17,490	33,662	21,472
	0,376	79,431	23,216	83,610	53,331
	0,688	79,977	30,871	84,118	53,655
	1	79,998	30,872	82,118	53,655

растяжении. Тут же приведены параметры модели пластического поведения бетона с накоплением повреждений [17].

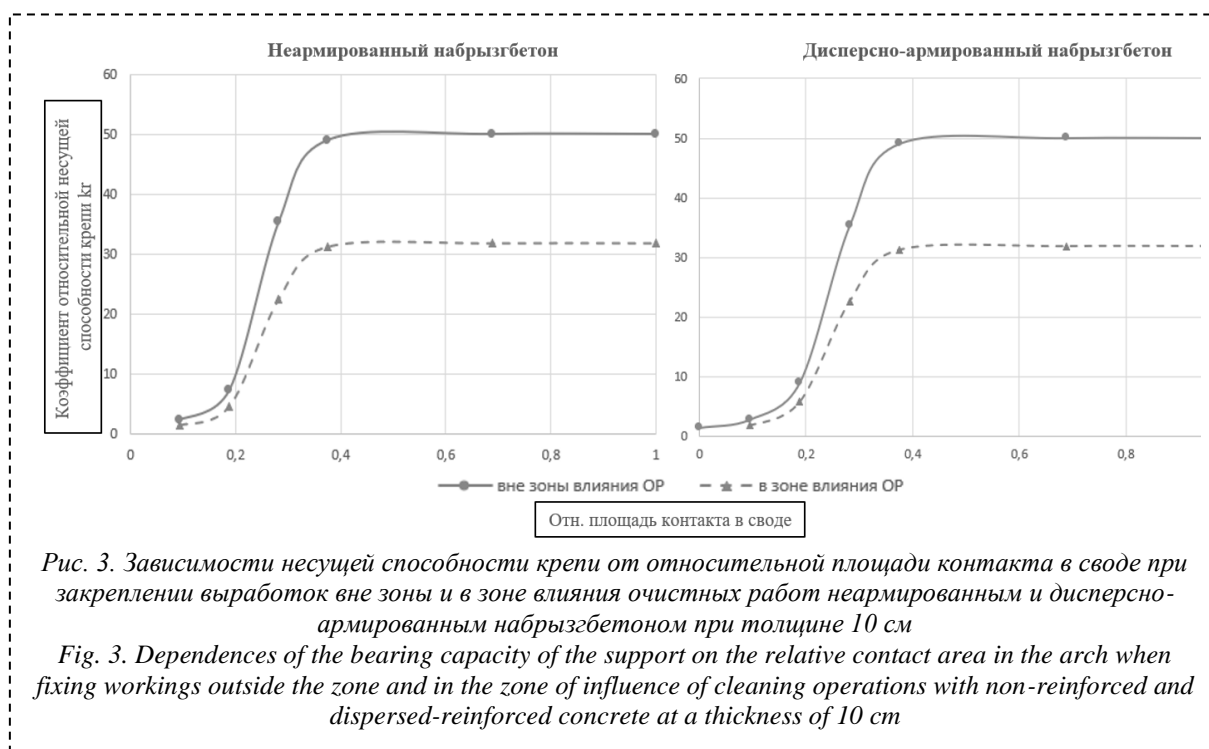
В допредельной зоне характер деформирования неармированного и дисперсно-армированного бетона схож. Основное отличие в механическом поведении проявляется в запредельной зоне деформирования. В связи с этим, за величину предельной несущей способности материала крепи принята величина, при которой сечение конструкции полностью теряет способность сопротивляться нагрузке, и происходит его разрушение с потерей способности сопротивляться дальнейшему нагружению.

Показатель остаточной прочности $R_{e,j}$, определяемый как соотношение остаточного сопротивления на растяжение при изгибе к предельной прочности на растяжение при изгибе в момент образования трещины, является определяющим показателем в установлении эффективности работы армированного фиброй бетона [23], принимается $R_{e,j} = 0,46$, что является минимально рекомендуемой величиной в научно-технической литературе для использования при креплении выработок [24].

Расчет несущей способности крепи производится на основании модели выработки, закрепленной крепью, расположенной в сплошном изотропном массиве (рисунок 1, б). При выполнении численного моделирования приняты следующие граничные условия: по верхним и нижним границам модели запрещены вертикальные смещения; по боковым граням модели запрещены смещения в горизонтальном направлении. Породный массив рассматривается только как элемент, оказывающий упругий отпор деформациям крепи, при этом он находится в начальном ненапряженном состоянии;

Активная нагрузка P_I или P_{III} , соответствующая определенному ранее весу отделившейся горной массы, прикладывается к внешнему контуру крепи горной выработки; гравитационная нагрузка (собственный вес) приложена только к крепи.

Важным условием для установления характера работы крепи является определение площади упругого отпора со стороны породного массива. Так как расположение блоков при различных системах трещиноватости может отличаться от рассмотренных вариантов, необходимо рассмотреть варианты, учитывающие упругий отпор по всей площади криволинейного очертания свода или по части площади (относительная площадь контакта 1; 0,688; 0,376; 0,188 соответствует полной площади контакта, $\frac{3}{4}$; $\frac{1}{2}$; $\frac{1}{4}$ соответственно). Взаимодействие между крепью и породой осуществляется через задание контактных условий. Величина коэффициента упругого отпора породы для скальных пород средней и малой прочности, сильнотрещиноватых принята равной $K_s=200$ МН/м³ согласно СП 122.13330.2012 [9].



Результаты и обсуждение. Моделирование выполнено в три этапа: последовательное установление контактного взаимодействия крепи и горной породы и приложение к крепи гравитационной нагрузки; приложение расчетной нагрузки от нарушенной зоны; увеличение нагрузки до величины, соответствующей несущей способности крепи.

В качестве расчетного показателя выбран коэффициент относительной несущей способности крепи k_r , определяемый как отношение нагрузки на пределе несущей способности крепи P_{max} к расчетной вертикальной нагрузке P_i .

Результаты расчета относительной несущей способности крепи из неармированного и дисперсно-армированного набрызгбетона в зависимости от условий обжатия крепи массивом горных пород для категории состояния пород «Б» представлены в таблице 3. Видно, что одинаковая толщина набрызгбетонной и дисперсно-армированной крепи при одинаковых условиях эксплуатации не дает ощутимую разницу в несущей способности.

При увеличении площади крепи, по которой приходится упругий отпор со стороны массива горных пород, значительно увеличивается максимальная несущая способность набрызгбетонной крепи в обоих случаях. Различие в несущей способности крепи наблюдается только в пределах величины относительной площади контакта горной массы с крепью до 0,4 (рисунок 3).

Это объясняется характером работы крепи при наличии или отсутствии упругого отпора со стороны массива. При действии активных нагрузок на крепь она деформируется, смещаясь в сторону породы и вызывая с ее стороны упругий отпор, ограничивающий деформации конструкции и возникающие в ней моменты, или в сторону выработки, вызывая значительные изгибающие моменты вследствие свободного деформирования.

Таким образом, при большей площади контакта несущая способность крепей из рассматриваемых материалов практически не отличается. Однако крепь из дисперсно-армированного набрызгбетона меньшей толщины выдерживает нагрузку даже при отсутствии упругого отпора, что позволяет рекомендовать ее применение в сильнотрещиноватом породном массиве при возможности нарушения сплошности приконтурного массива.

Заключение. В статье приведены исследования несущей способности набрызгбетонной и дисперсно-армированной набрызгбетонной крепи в условиях среднеустойчивых пород, характеризующихся по трещиноватости как сильнотрещиноватые или раздробленные.

Применение дисперсно-армированного бетона взамен неармированного позволяет достичь снижения толщины крепи и повышения ее стойкости к образованию трещин и сколов при

сложном нагружении. Дисперсно-армированный набрызгбетон характеризуется также более высокой остаточной прочностью.

Выполнено обоснование модели неармированного и дисперсно-армированного бетонов. Выбранная модель (concrete damage plasticity model) основана на пластическом поведении бетона с накоплением повреждений, параметры модели определены на основании обработки выполненных лабораторных испытаний образцов из неармированного и дисперсно-армированного бетона.

С применением обоснованной модели выполнен расчет максимальной несущей способности набрызгбетонных крепей и дисперсно-армированных крепей толщиной 10 и 15 см с учетом влияния площади контакта в своде крепи, по которой осуществляется упругий отпор со стороны массива горных пород. Выявлено, что наиболее неблагоприятным является условие работы крепи при условии отсутствия упругого отпора. В дальнейшем при проведении натурных исследований существует вероятность оптимизировать параметры крепи (снизить толщину крепления без влияния на безопасность ведения работ), за счет определения условий обжатия набрызгбетонных крепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жиров, Д.В. Реконструкция эволюции хрупких деформаций массива пород Ньюаркского месторождения апатит-нефелиновых руд / Д.В. Жиров, Ю.Г. Горбунов, А.К. Шпаченко, В.В. Рыбин // Инновационный потенциал Кольской науки, 2005 – с. 16-21
2. Марков, Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. – 231 с.
3. Protosenya, A. G. Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass / A.G. Protosenya, M.A. Karasev, P.E. Verbilo // International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018. № 11, Т 9 – р. 1962-1972
4. Balandin, V. V. Application of generalized Hoek–Brown criterion to selection and design of mine support systems for the Oktyabrsky copper–nickel deposit / V.V. Balandin, V.L. Leonov, A.D. Kuranov, I.I. Bagautdinov // Gornyi Zhurnal, 2019. № 11. – р. 14-18.
5. Огородников, Ю.Н. Рациональные конструкции перекрытия крепи сопряжений выработок в массиве железно-слюдково-маритовых руд Яковлевского месторождения / Ю.Н. Огородников, В.И. Очуров // Записки Горного института, 2011. Т.172
6. Огородников, Ю.Н. Проектирование крепи одностороннего прямоугольного сопряжения горизонтальных выработок / Ю.Н. Огородников, В.И. Очуров, Д.Н. Петров // Записки Горного института, 2011. т.172. – с. 197-201
7. Киреев, П. Б. Перспективы развития метода набрызгбетона для возведения крепей и тоннелей / П.Б. Киреев, И.В. Сапронов, М.В. Гарипов, К.А. Головин // Известия ТулГУ. Науки о Земле, 2012. №1.
8. Зубков, А.А. Перспективные способы крепления горных выработок на подземных рудниках / А.А. Зубков, В.В. Латкин, С.С. Неугомонов, П.В. Волков // ГИАБ, 2014. №S1-1.
9. Di Carlo, F. Design procedure of precast fiber reinforced concrete segments for tunnel lining construction / F. Di Carlo, A. Meda, Z. Rinaldi // Structural Concrete, 2016. V.17 <https://doi.org/10.1002/suco.201500194>.
10. Guang-yao, C. Study on the Model Test of the Antibreaking Effect of Fiber Reinforced Concrete Lining in Tunnel / C. Guang-yao, W. Xue-lai, W. Dao-yuan // Shock and Vibration, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5419650>
11. Бенин, А.В. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения / А.В. Бенин, А.С. Семенов, С.Г Семенов, Б.Е. Мельников // Magazine of Civil Engineering, 2014. №1. – с.23-37
12. Löfgren, I. Fibre- reinforced concrete for industrial construction- a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis. Ph.D. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2005.
13. Caratelli, A. Precast tunnel segment in fiber reinforced concrete / A. Caratelli, A. Meda, Z. Rinaldi, P. Perruzza, P. Romualdi // Proceedings of Concrete Engineering for Excellence and Efficiency, 2011.
14. Craig, R.J. Structural applications of reinforced steel fibrous concrete // Concrete Int. Design and Construction, 1984.
15. Meskenas, A. Determination of the Stress–Crack Opening Relationship of SFRC by an Inverse Analysis / A. Meskenas, G. Kaklauskas, A. Daniunas, D. Bacinskas, R. Jakubovskis, S. Gribniak, V. Gelazius // Mechanics of Composite Materials, 2014. Vol. 49. No.6. – p. 685-690

16. Протосеня, А.Г. Introduction of the method of finite-discrete elements into the Abaqus/Explicit software complex for modeling deformation and fracture of rocks / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев, В.И. Очуров // Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2017. № 6, Т 7. – С. 11 -18.
17. Smirnova, O.M. Strength and Deformability Properties of Polyolefin Macrofibers Reinforced Concrete / O.M. Smirnova, A.A. Shubin, I.V. Potseshkovskaya // International Journal of Applied Engineering Research, 2017. № 20, V 12. – p. 9397-9404.
18. Корсакова, О.П. Блочное строение Кольского полуострова: морфологическое районирование, геоэкологическая устойчивость в условиях природно-технических систем (на примере горных массивов Хибин и Ловозеро) / О.П. Корсакова, В.В. Колька, С.Н. Савченко // Вестник МГТУ, 2009. Т. 12, №3. – С.478-491.
19. Багаутдинов, И.И. Прогноз напряженно-деформированного состояния трещиноватого рудного массива вокруг выработки / А.Г. Протосеня, И.И. Багаутдинов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2015. – №4. – С. 45-51
20. Grassl, P. CDPМ2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete / P. Grassl, D. Xenos, U. Nyström, R. Rempling, K. Gylltoft // International Journal of Solids and Structures, 2013. V. 50, Issue 24. – P. 3805-3816 <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.07.008>.
21. Hafezolghorani Esfahani, M. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete / M. Hafezolghorani Esfahani, F. Hejazi, R. Vaghei, M. Jaafar, K. Karimzade // Structural Engineering International, 2017. №27. – p. 68-78. [10.2749/1016866616X1081](https://doi.org/10.2749/1016866616X1081).
22. Paliwal, B. A three-invariant cap-plasticity damage model for cementitious materials / B. Paliwal, Y. Hammi, R.D. Moser, M.F. Horstemeyer // International Journal of Solids and Structures, 2017. V. 108. – P. 186-202, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.12.015>.
23. Kral, P. Identification of the Parameters of a Concrete Damage Material Model / P. Kral, P. Hradil, J. Kala, F. Hokes, M. Husek // Procedia Engineering, 2017. V. 172. – P. 578-585 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.068>.
24. Голдобина, Л.О. Исследование свойств фибробетона при различных условиях набора прочности / Л.О. Голдобина, В.Ю. Синегубов // COLLOQUIUM-JOURNAL, 2019. №13-3 (37). – с. 24-30.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-5-14

UDS 622

FORECAST OF STRESS-STRAIN STATE OF FIBER-REINFORCED CONCRETE SUPPORT IN DISCONTINUOUS ROCK MASSES

Anatoliy G. Protosenya ¹,

Dr. Sc. in Engineering, professor, e-mail: kaf-sgp@mail.ru

Maria A. Vilner ²,

postgraduate, e-mail: mary.vilner@gmail.com

Saint-Petersburg mining university, 199106, Russian Federation, Saint-Petersburg, 21 line of V.O., 2



Article info

Received:

15 September 2021

Revised:

30 September 2021

Abstract.

Maintaining of the mine drifts stability is a priority in the work of a mining enterprise. Over time, it becomes necessary to develop mineral resources that are situated in increasingly difficult mining and geological conditions. A highly jointed rock mass can be considered as a particular case. The most unfavorable case of lining loading is the separation of rock mass in the roof or sides of the working, while the entire weight of the separated rock falls on the lining. In addition, when the rock mass acts on the support, the support might

Accepted:
25 October 2021

Keywords: stress-strain state, jointed rock mass, apatite-nepheline deposit, drift support, shotcrete, fiber-reinforced concrete, model of concrete plastic behavior, numerical modeling

be partly stretched. These conditions lead to the need to develop and use advanced supports at mining enterprises. The article substantiates the use of fiber-reinforced shotcrete lining instead of monolithic concrete or shotcrete. The main advantage of such lining is an increase in the strength characteristics of concrete due to the reinforcement with steel or composite fiber. Compared to shotcrete, the tensile strength in bending differs by 150-180 %. The study of the behavior of fiber-reinforced shotcrete with different mechanical characteristics is carried out using numerical simulation methods. The dependences of the bearing capacity of the lining on the characteristics of concrete in various conditions are obtained, and the residual strength is analyzed. The conditions for using fiber-reinforced shotcrete lining instead of monolithic concrete and shotcrete linings have been substantiated.

For citation Protosenya A.G., Vilner M.A. Forecast of stress-strain state of fiber-reinforced concrete support in discontinuous rock masses. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, no.5 (147), pp. 5-14. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-5-14

REFERENCES

1. Zhirov D.V. Rekonstruktsiya evolyutsii khрупkikh deformatsiy klassa N'orkpakhkского mestorozhdeniya apatit-nefelinovykh rud / Zhirov D.V., Gorbunov YU.G., Shpachenko A.K., Rybin V.V. // *Innovatsionnyy potentsial Kol'skoy nauki*, 2005 - p. 16-21
2. Markov, G.A. Tektonicheskiye napryazheniya i gornoye davleniye v rudnikakh Khibinskogo massiva. L.: Nauka, 1977. - 231 p.
3. Protosenya A. G. Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass / Protosenya A.G., Karasev M.A., Verbilo P.E. // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018. № 11, Vol 9 – p. 1962-1972
4. Balandin V. V. Application of generalized Hoek–Brown criterion to selection and design of mine support systems for the Oktyabrsky copper–nickel deposit / Balandin V.V., Leonov V.L., Kuranov A.D., Bagautdinov I.I. // *Gornyi Zhurnal*, 2019. № 11. – p. 14-18.
5. Ogorodnikov YU.N. Ratsional'nyye konstruksii perekrytiya krepki sopryazheniy vyrabotok v massive zhelezno-slyudkovo-martitovykh rud Yakovlevskogo mestorozhdeniya / Ogorodnikov YU.N., Ochkurov V.I. // *Zapiski Gornogo instituta*, 2011. Vol.172.
6. Ogorodnikov YU.N. / Ogorodnikov YU.N., Ochkurov V.I., Petrov D.N. // *Zapiski Gornogo instituta*, 2011. Vol.172. - P. 197-201
7. Kireyev P. B. Perspektivy razvitiya metoda nabryzgbetona dlya vozvedeniya krepki i tonneley / Kireyev P.B., Sapronov I.V., Garipov M.V., Golovin K.A // *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, 2012. №1.
8. Zubkov A.A. Perspektivnyye sposoby krepki gornyykh vyrabotok na podzemnykh rudnikakh Zubkov A.A., Latkin V.V., Neugomonov S.S., Volkov P.V. // *GIAB*, 2014. №S1-1.
9. Di Carlo F. Design procedure of precast fiber reinforced concrete segments for tunnel lining construction / Di Carlo F., Meda A., Rinaldi Z. // *Structural Concrete*, 2016. Vol.17 <https://doi.org/10.1002/suco.201500194>.
10. Guang-yao C. Study on the Model Test of the Antibreaking Effect of Fiber Reinforced Concrete Lining in Tunnel / Guang-yao C., Xue-lai W., Dao-yuan W. // *Shock and Vibration*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5419650>
11. Benin A.V. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa razrusheniya stsepleniya armatury s betonom. Chast' 2. Modeli bez ucheta nesploshnosti soyedineniya / Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G, Mel'nikov B.Ye. // *Stroitel'nyy zhurnal*, 2014. №1. - p.23-37
12. Löfgren, I. Fibre-reinforced concrete for industrial construction- a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis. Ph.D. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2005.
13. Caratelli A. Precast tunnel segment in fiber reinforced concrete / Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z., Perruzza P., Romualdi P. // *Proceedings of Concrete Engineering for Excellence and Efficiency*, 2011.
14. Craig R.J. Structural applications of reinforced steel fibrous concrete // *Concrete Int. Design and Construction*, 1984.
15. Meskenas A. Determination of the Stress-Crack Opening Relationship of SFRC by an Inverse Analysis / Meskenas A., Kaklauskas G., Daniunas A., Bacinskas D., Jakubovskis R., Gribniak S., Gelazius V. // *Mechanics of Composite Materials*, 2014. Vol. 49. No.6. – p. 685-690
16. Protosenya A.G. Vnedreniye metoda konechno-diskretnykh elementov v programmnyy kompleks Abaqus / Explicit dlya modelirovaniya deformirovaniya i razrusheniya gornyykh porod / Protosenya A.G., Karasev M.A., Ochkurov V.I. // *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 2017. № 6, Vol 7. - P. 11-18.

17. Smirnova O. M. Strength and Deformability Properties of Polyolefin Macrofibers Reinforced Concrete / Smirnova O. M., Shubin A. A., Potseshkovskaya I. V. // *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017. № 20, V 12. – P. 9397-9404.
18. Korsakova O.P. Blokovoje stroyeniye Kol'skogo poluostrova: morfologicheskoye rayonirovaniye, geokologicheskaya ustoychivost' v usloviyakh prirodno-sistem (na primere gornykh massivov Khibiny i Lovozero) / Korsakova O.P., Kol'ka V.V., Savchenko S.N. // *Vestnik MGTU*, 2009. Vol. 12, №3. - P.478-491.
19. Bagautdinov I.I. Prognoz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rudnogo kamnya vokrug treshchki / A.G. Protosenya, I.I. Bagautdinov // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*, 2015. - №4. - P. 45-51
20. Grassl P. CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete / Grassl P., Xenos D., Nyström U., Rempling R., Gylltoft K.// *International Journal of Solids and Structures*, 2013. V. 50, Issue 24. – P. 3805-3816 <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.07.008>.
21. Hafezolghorani Esfahani M. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete / Hafezolghorani Esfahani M., Hejazi F., Vaghei R., Jaafar M., Karimzade K. // *Structural Engineering International*, 2017. №27. – p. 68-78. 10.2749/101686616X1081.
22. Paliwal B. A three-invariant cap-plasticity damage model for cementitious materials / Paliwal B., Hammi Y., Moser R.D., Horstemeyer M.F. // *International Journal of Solids and Structures*, 2017. V. 108. – P. 186-202, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.12.015>.
23. Kral P. Identification of the Parameters of a Concrete Damage Material Model / Kral P., Hradil P., Kala J., Hokes F., Husek M.// *Procedia Engineering*, 2017. V. 172. – P. 578-585 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.068>.
24. Goldobina L.O. Issledovaniye svoystv fibrobeta pri razlichnykh usloviyakh nabora prochnosti / Goldobina L.O., Sinegov V.YU. // *KOLLOKIUM-ZHURNAL*, 2019. №13-3 (37). - P. 24-30.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).