

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО БЕТОНА

П.К. Тулин¹, В.И. Очкуров¹, А.А. Шубин¹, Р.О. Сотников¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ross61@mail.ru

Аннотация: Для решения проблем, связанных с усложнением условий проходки и ускорением темпов строительства, рассматриваются и создаются новые типы крепей. В частности, монолитная бетонная крепь заменяется на крепь, возводимую безопалубочным способом — набрызгбетонную, преимуществом которой является повышенная прочность на растяжение. Для использования дисперсно-армированной набрызгбетонной крепи необходимо установить ее несущую способность, при этом принято, что за величину предельной несущей способности материала крепи принимается значение, при котором сечение конструкции полностью теряет способность сопротивляться нагрузке, и происходит его разрушение с потерей способности сопротивляться дальнейшему нагружению. Для установления такого значения необходимо изучить параметры запредельного деформирования, которые на настоящий момент не установлены нормативными документами. Выполнено численное моделирование пластического поведения образца армированного фиброй бетона, параметры которого установлены в соответствии с лабораторными испытаниями. Выполнено моделирование испытания бетонного элемента на трехточечный изгиб и одноосное растяжение. На основании проведенных экспериментов предлагается диаграмма для запредельной области деформирования образцов в продольном направлении в осях «осевые напряжения — ширина раскрытия трещины». Полученные данные могут использоваться как параметры модели пластического поведения бетона с накоплением повреждений при определении несущей способности крепи горной выработки.

Ключевые слова: крепь, дисперсно-армированный набрызгбетон, фибра, лабораторные испытания, растяжение при изгибе, пластическое поведение, запредельная область деформирования, численное моделирование.

Для цитирования: Тулин П. К., Очкуров В. И., Шубин А. А., Сотников Р. О. Методика определения свойств дисперсно-армированного бетона // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 129–141. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_129.

Fiber-reinforced concrete testing procedure

P.K. Tulin¹, V.I. Ochukov¹, A.A. Shubin¹, R.O. Sotnikov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: ross61@mail.ru

Abstract: The problems connected with difficult conditions and higher rates of mining can be solved using new types of mine support. In particular, the monolithic concrete lining can be replaced by the shotcrete lining advantageous for the higher tension strength. Fiber-reinforced shotcreting requires knowing the load-bearing capacity of the material. The ultimate load-bearing capacity of fiber-reinforced shotcrete is assumed as the value at which the structure loses ability to resist loading and fails. In order to find this value, it is required to examine the post-

limit deformation parameters which are unstated in the regulatory documents. Within the framework of this research, numerical modeling of the plastic behavior of fiber-reinforced concrete was performed using the lab-scale test data. The three-point bending tests and the uniaxial tension tests of a concrete structure are modeled. Based on the experimental data, the post-limit deformation domain longitudinally the test specimens is plotted in the axial stresses–fracture width coordinates. The obtained data can be used as the model parameters of the plastic behavior of concrete during accumulation of defects to determine the mine support load-bearing capacity.

Key words: mine support, fiber-reinforced shotcrete, fiber, laboratory tests, bending tension, plastic behavior, post-limit deformation domain, numerical modeling.

For citation: Tulin P. K., Ochukurov V. I., Shubin A. A., Sotnikov R. O. Fiber-reinforced concrete testing procedure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(8):129-141. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_129.

Введение

В настоящее время актуальной проблемой горнодобывающей промышленности является повышение технико-экономических показателей рудников. Одним из перспективных способов является разработка и внедрение новых типов крепей. Предпочтение отдается облегченным и технологичным типам крепей, требующим низких трудовых и материальных затрат. Такими крепями, в частности, являются набрызгбетон и анкерное крепление [1, 2].

На ряде рудников со сложными горно-геологическими условиями используется крепление монолитным бетоном. Данный способ является достаточно трудоемким и дорогостоящим. Основываясь на опыте отечественных и зарубежных предприятий [1, 3–5], можно утверждать, что во многих случаях перспективна замена монолитной бетонной крепи на другие без потерь с точки зрения несущей способности крепи.

Набрызгбетон возможно применять в сочетании с различными добавками, обеспечивающими ускорение твердения смеси и повышение прочности бетона, даже в слабоустойчивых породах. Анализ опыта крепления выработок на рудниках показал, что в настоящее вре-

мя возможности набрызгбетонной крепи используются не полностью, и значительную долю от объема использования монолитной бетонной крепи можно выполнить набрызгбетоном с применением различных добавок, в том числе и фибры — дисперсно-армированный набрызгбетон [3, 6, 7].

Переход на новые виды материалов для крепления требует тщательного расчета и технико-экономического обоснования. В частности, необходимо определить несущую способность крепи, усиленной дисперсным армированием.

Для использования результатов лабораторных исследований дисперсно-армированного набрызгбетона их необходимо представить в виде зависимостей изменения напряжений от ширины раскрытия трещины. В нормативных документах есть рекомендации по переводу прочности бетона на растяжение при изгибе к прочности бетона на одноосное растяжение. Однако эти рекомендации применимы только для определенных типов неармированных бетонов и не позволяют построить диаграмму предельного деформирования бетона при одноосном растяжении.

В работе предложен подход построения диаграммы предельного деформи-

рования бетона при одноосном растяжении на основании результатов испытания бетона на растяжение при изгибе. Он заключается в подборе параметров модели пластического поведения бетона по результатам проведения численного эксперимента.

Подбор параметров выполняется в следующей последовательности:

1. С учетом рекомендаций нормативных документов [8–11], а также публикаций в научных статьях [6, 12] и исходных данных о деформировании конкретного образца набрызгбетона или дисперсно-армированного набрызгбетона, определяются предварительные (ориентировочные) параметры модели пластического поведения бетона с разрушением.

2. Выполняется построение численной модели испытания бетонной балочки при трехточечном изгибе.

3. Если результаты численного эксперимента отличаются не более чем на 10% (пиковое значение нагрузки, при которой зарождается трещина, не должно отличаться более чем на 5%) от результатов лабораторных испытаний, то переходим к следующему шагу (4). Если условие не выполняется, параметры модели корректируются, и шаг (3) численного эксперимента повторяется.

4. Выполняется построение численной модели испытания бетона на одноосное растяжение.

5. Полученные на (4) шаге результаты численного моделирования обрабатываются и представляются в осях «косевые напряжения — ширина раскрытия трещины».

Дисперсное армирование набрызгбетона

Набрызгбетонная крепь представляет собой покрытие, наносимое на поверхность выработки, его отличительной особенностью работы является полный

контакт по всей поверхности выработки с горными породами и образование за счет этого единой деформируемой системы [4, 13], что и позволяет в полной мере использовать несущую способность массива. Набрызгбетонная крепь повторяет форму поверхности выработки, имеет неровности, соизмеримые и даже превышающие ее толщину.

Для повышения эффективных показателей механической работы набрызгбетонной крепи выполняется ее дисперсное армирование металлическими, синтетическими или другими типами волокон [14, 15]. Волокна, или фибра, применяемые для армирования набрызгбетона, позволяют повысить прочность бетона на растяжение при изгибе и частично сохраняют способность сопротивляться действию внешних нагрузок после образования трещины. При достижении предельного состояния происходит перераспределение усилий, и максимальные значения напряжений перемещаются от участка образования трещины в краевые зоны. В допредельной зоне деформирования дисперсно-армированный и неармированный виды набрызгбетона ведут себя схоже. Основное отличие в механическом поведении проявляется в запредельной зоне деформирования [16–18].

В связи с этим за величину предельной несущей способности материала крепи принимается величина, при которой сечение конструкции полностью теряет способность сопротивляться нагрузке, и происходит его разрушение с потерей способности сопротивляться дальнейшему нагружению.

Методика определения предела прочности дисперсно-армированного бетона на растяжение при изгибе

В настоящее время существует методика, устанавливающая требования к

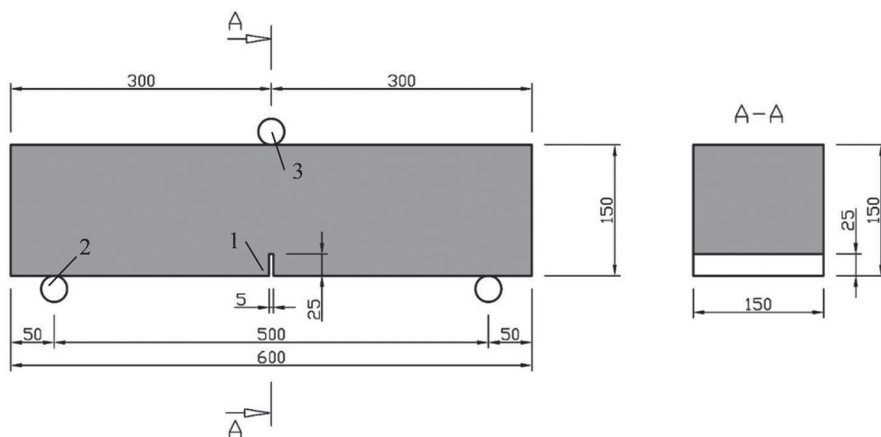


Рис. 1. Схема испытания образца на растяжение при изгибе [1]: 1 – датчик перемещений; 2 – опорные ролики; 3 – нагружающий ролик

Fig. 1. Bending tension testing [1]: 1–displacement sensor; 2– support rolls; 3– load roll

подготовке и проведению испытаний дисперсно-армированного бетона с целью определения его предела прочности на растяжение при изгибе [6, 10, 11]. При определении предела прочности на растяжение при изгибе используются образцы в форме призмы, или балочки. Отношение высоты к ширине образца принимаются равным 4. Размеры призмы – 150×150×600 мм, серия состоит из шести образцов.

Схема испытания образца на растяжение при изгибе и общий вид устрой-

ства для передачи нагрузки представлены на рис. 1.

Испытательные образцы изготавливаются и подготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 10180 и стандарта EN 14651-2007 [8, 19]. Датчик, измеряющий величину перемещения внешних граней надреза (CMOD), устанавливается в выполненном надрезе в центральной части образца.

Определение предела пропорциональности LOP , характеризуемого предельной прочностью на растяжение при

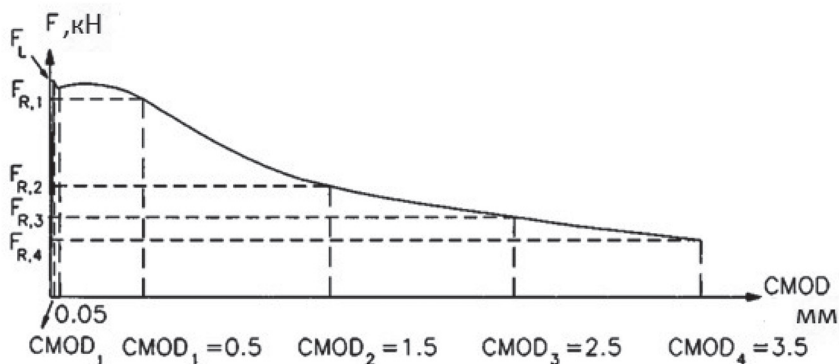


Рис. 2. График для определения остаточной прочности дисперсно-армированного бетона на растяжение при изгибе

Fig. 2. Determination of residual tensile bending strength of fiber-reinforced concrete

Таблица 1

Взаимосвязь между $CMOD$ и δ
Relationship of $CMOD$ and δ

$CMOD$, мм	0,05	0,1	0,2	0,5	1,5	2,5	3,5	4,0
δ , мм	0,08	0,13	0,21	0,47	1,32	2,17	3,02	3,44

изгибе в момент образования трещины $f_{fct.l}$ рассчитывается по нижеприведенной формуле, исходя из значения максимальной величины нагрузки, зафиксированной при испытании образца балочки с надрезом в интервале $CMOD$ от 0 до 0,05 мм:

$$f_{fct.l} = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2},$$

где F_L — максимальная величина нагрузки, зафиксированная при испытании образца балки с надрезом в интервале $CMOD$ от 0 до 0,05 мм; l — длина пролета; b — ширина образца; h_{sp} — расстояние между вершиной надреза и верхней (сжатой) гранью образца.

Остаточное сопротивление на растяжение при изгибе $f_{fR,j}$ (рис. 2) определяется с точностью до 0,1 МПа по формуле:

$$f_{fR,j} = \frac{3F_{R,j} l}{2bh_{sp}^2},$$

где $F_{R,j}$ — нагрузка, соответствующая $CMOD = CMOD_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$).

Остаточное сопротивление на растяжение при изгибе необходимо определить при величине $CMOD_j$, равной 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 мм соответственно для $j = 1; 2; 3; 4$.

Показатель остаточной прочности $R_{e,j}$ является определяющим в установлении эффективности работы бетона, армированного фиброй, и для каждого из $CMOD$ определяется по следующей зависимости:

$$R_{e,j} = \frac{f_{fR,j}}{f_{fct.l}}.$$

Преобразования графиков «нагрузка — $CMOD$ » в график «нагрузка — прогиб» можно провести с использованием значений $CMOD$ и δ , приведенных в табл. 1.

Класс фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе — показатель качества фибробетона, обозначаемый числом и строчной латинской буквой. Число в обозначении класса характеризует гарантированную прочность фибробетона на растяжение при изги-

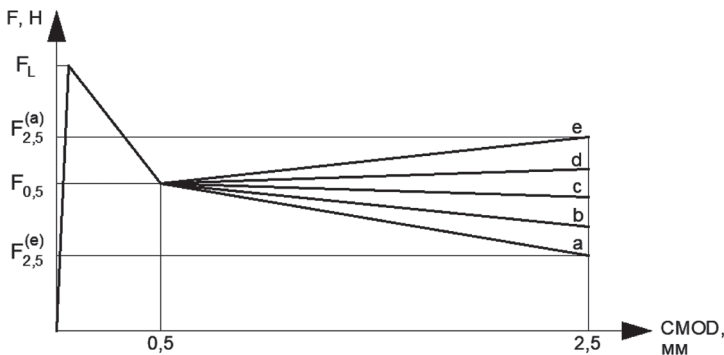


Рис. 3. Приведенный график $F - CMOD$ для назначения класса дисперсно-армированного бетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе

Fig. 3. Reduced $F - CMOD$ curve for class definition of fiber-reinforced concrete by residual tensile bending strength

бе $R_{F0.5,n}$ с обеспеченностью 0,95, соответствующей продольной деформации надреза образца-балки $CMOD = 0,5$ мм при испытаниях на изгиб. Латинская буква характеризует отношение гарантированных прочностей фибробетона на растяжение при изгибе $R_{F2.5,n}$ и $R_{F0.5,n}$ при $CMOD = 2,5$ мм и $CMOD = 0,5$, мм соответственно (рис. 3):

- a — при $0,5 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 0,7$;
- b — при $0,7 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 0,9$;
- c — при $0,9 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 1,1$;
- d — при $1,1 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 1,3$;
- e — при $1,3 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n}$.

Численная модель испытания бетона на растяжение при изгибе

В качестве базовой модели, описывающей поведение неармированного и дисперсно-армированного набрызгбетонного покрытия под нагрузкой, применялась модель пластического поведения бетона с накоплением повреждений (concrete damage plasticity model) [5]. Эта модель предназначена для описания механического поведения бетона при одноосном, двухосном и объемном напряженных состояниях при незначительных величинах бокового обжатия.

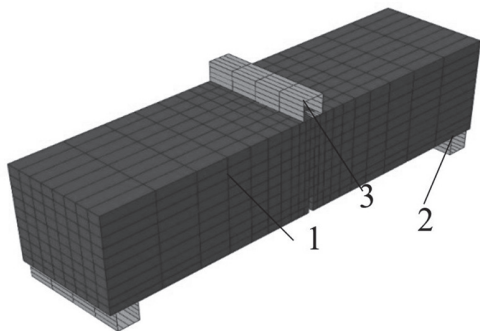


Рис. 4. Конечно-элементная модель для проведения виртуального эксперимента испытания бетонной балочки при трехточечном изгибе: 1 — бетонная балочка, 2 — опорные элементы, 3 — нагружающий элемент

Fig. 4. Finite element model of virtual three-point bend test of concrete bar: 1 — concrete bar; 2 — supporting structure; 3 — loading structure

Численная модель испытания бетона на растяжение при изгибе (рис. 4) представляет собой отдельные элементы, взаимодействие между которыми осуществляется через специальные контактные условия (контактные элементы). Бетонная балочка моделируется сплошными деформируемыми конечными элементами. Опорные и нагружающий элементы моделируются абсолютно жесткими телами. Размеры балочки и расстояние между опорными элементами принято согласно схеме (см. рис. 1) лабораторных испытаний бетонных балочек на изгиб.

Принята следующая последовательность проведения численного эксперимента: 1 этап — установление контактного взаимодействия между испытуемой бетонной балочкой, опорными и нагружающим элементами; 2 этап — передача сосредоточенной нагрузки от нагружающего элемента на испытуемую бетонную балочку.

Численная модель испытания бетона при одноосном растяжении

Численная модель испытания бетона на одноосное растяжение представляет собой модель (рис. 5, а), с размерами $15 \times 15 \times 55$ см с выделенным по центру участком ослабления размером $10 \times 10 \times 6$ см. Ослабление необходимо для локализации пластических деформаций на определенном участке, что позволяет отслеживать ширину раскрытия трещины, а также в явном виде задать участок пластических деформаций и накопления повреждений в бетоне.

Численное моделирование выполнялось при следующих граничных условиях: перемещения по низу модели запрещены по всем направлениям; перемещения верхней части модели запрещены в горизонтальной плоскости; в вертикальном направлении приложены вынужден-

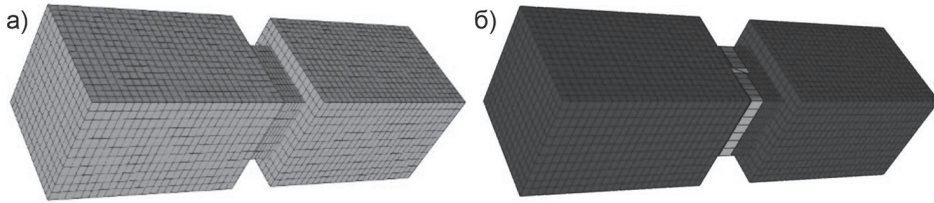


Рис. 5. Конечно-элементная модель испытаний бетона на одноосное растяжение (а) и характер деформирования образца бетона при одноосном растяжении по результатам численного моделирования (б)
 Fig. 5. Finite element model of uniaxial tension test (a) and deformation behavior of concrete specimen in uniaxial tension by numerical modeling results (b)

ные положительные перемещения, которые моделируют процесс одноосного растяжения образца бетона. Их величина составляла не более 5 мм, что достаточно для моделирования испытания на одноосное растяжение всех рассматриваемых материалов (бетон классом по прочности В15, набрызгбетон, дисперсно-армированный набрызгбетон). Ниже представлена типовая картина деформирования образца при численном эксперименте (рис. 5, б).

По результатам испытаний выполнялось построение диаграммы в осях «косевые растягивающие напряжения — ширина раскрытия трещины в направлении приложенной нагрузки» (рис. 6). В последующем эти данные используются как параметры модели пластиче-

ского поведения бетона с накоплением повреждений при определении несущей способности крепи горной выработки.

Модель механического поведения бетона

Для моделирования развития напряженно-деформированного состояния бетона принята модель пластического деформирования с накоплением повреждений CDP, которая включает законы пластического изотропного упрочнения и разупрочнения среды и накопление повреждений по мере накопления сдвиговых/нормальных растягивающих деформаций. Полные деформации складываются из упругой части ε^{el} и пластичной части ε^{pl} :

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl}.$$

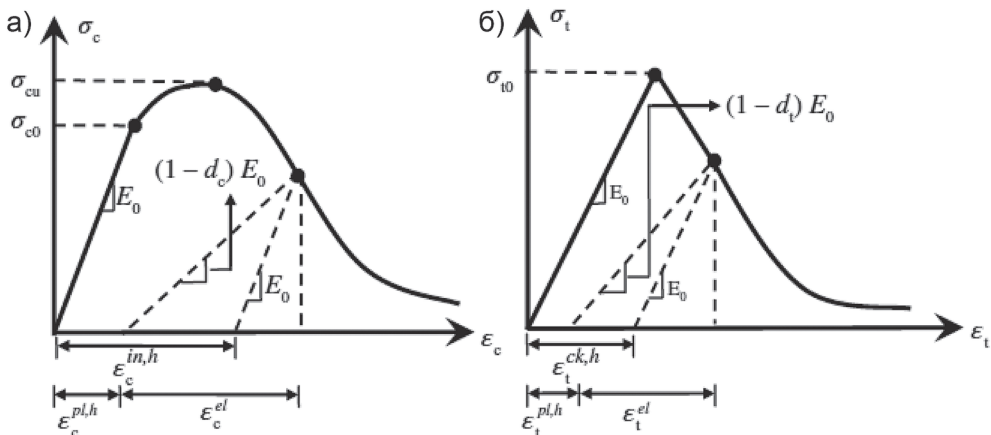


Рис. 6. Деформирование в условиях одноосного сжатия (а) и одноосного растяжения (б) [21]
 Fig. 6. Deformation in uniaxial compression (a) and uniaxial tension (b) [21]

Поверхность пластического течения задается в виде следующей функции, которая определяет мобилизованную прочность бетона, характеризуемую величиной достигнутых сдвиговых или растягивающих деформаций [18]:

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot \left(\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\bar{\varepsilon}_c^{pl}) (\hat{\sigma}_{\max}) - \gamma(-\hat{\sigma}_{\max}) \right) - \bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl}) = 0$$

$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0} / \sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0} / \sigma_{c0}) - 1}; \quad 0 \leq \alpha \leq 0,5,$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha),$$

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1},$$

где $\hat{\sigma}_{\max}$ — главные максимальные нормальные напряжения; σ_{b0}/σ_{c0} — отношение прочности в условиях двухосного сжатия к пределу прочности при одноосном сжатии (значение принимается 1,16); K_c — соотношение прочности при трехосном растяжении $q(TM)$ к трехосному сжатию при постоянном значении средних напряжений $q(CM)$, должно удовлетворяться условие $0,5 \leq K_c \leq 1$; $\bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t^{pl})$ — показатель прочности при растяжении, характерный для достигнутой деформации $\bar{\varepsilon}_t^{pl}$; $\bar{\sigma}_c(\bar{\varepsilon}_c^{pl})$ — показатель прочности при сжатии, характерный для достигнутой деформации $\bar{\varepsilon}_c^{pl}$.

В формулировке модели бетона принято, что процесс изотропного упрочнения выражен через накопление пластических деформаций сдвига $\varepsilon_c^{in,h}$ и деформацией растяжения $\varepsilon_t^{ck,h}$, характеризующих ширину раскрытия трещин, которые включают в себя пластическую деформацию упрочнения $\varepsilon_c^{pl,h}$ плюс остаточную деформацию из-за повреждений.

Показатели упрочнения определяют положение поверхности пластического течения в зависимости от величины достигнутых пластических деформаций.

В модели CDP пластические деформации определяются следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \dot{\lambda} \cdot \frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}}.$$

В модели CDP закон пластического течения не ассоциированный, так как уравнения функции пластического течения $f(\varepsilon^{pl,h}, \bar{\sigma})$ и пластического потенциала g_p не одинаковы, и, следовательно, направление пластического течения, определяемое как $\frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}}$, не нормально к поверхности пластического течения.

Напряжения в бетоне (рис. 6) определяются с учетом накопления повреждений в нем при сжатии или растяжении согласно следующей зависимости:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl,h}),$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl,h}),$$

где d_t и d_c — две скалярные переменные, характеризующие накопление повреждений в среде, варьирующиеся от 0 (ненарушенное сложение) до 1 (раздробленное состояние) [20]. Модель повреждения, используемая для бетона, была основана на пластичности, при использовании этой модели рассматривают процесс деформирования бетона через упрочнение и разупрочнение среды при сдвиге и растяжении.

Параметры модели пластического поведения бетона с накоплением повреждений, принятые при выполнении численного моделирования, сведены в таблицу (табл. 2).

Результаты

На основании выполненных исследований установлено, что величина максимального прогиба при выполнении

Таблица 2

Параметры модели пластического поведения бетона с накоплением повреждений
Model parameters of plastic behavior of concrete during accumulation of defects

Наименование материала	Модуль упругости, E_c , ГПа	Кэф. Пуассона ν	Прочность на сжатие, f_{cm} , МПа	Прочность на растяжение, f_{ctm} , МПа	Угол внутреннего трения, ψ	Кэф. соотношения прочности в условиях двусосного сжатия к одноосному сжатию, a_f	Эксцентриситет пластического потенциала, a_y	Кэф. формы поверхности пластического течения, K_c
Бетон класса В15	24	0,2	11	1,1	30	1,16	0,1	0,667
Набрызгбетон неармированный	30	0,2	22	1,8	30	1,16	0,1	0,667
Дисперсно-армированный набрызгбетон	30	0,2	24	1,8	30	1,16	0,1	0,667

численного эксперимента не превышала 2 см. Данной величины смещения было достаточно, чтобы получить полную запредельную диаграмму деформирования балочки. По результатам испытаний выполнялось построение диаграммы в осях «нагрузка — ширина раскрытия трещины», а также сравнение с результатами лабораторных испытаний балочки на растяжение при изгибе при численном эксперименте (рис. 7).

Выполненное комплексное исследование позволило установить несущую способность набрызгбетонной крепи с армированием фиброй. Лабораторные испытания позволили подобрать численные параметры модели, описываю-

щие пластическое поведение бетона с накоплением повреждений с отклонением от лабораторных результатов не более 10%. По результатам испытаний установлен характер запредельного деформирования бетона.

Проведены численные эксперименты, по результатам которых подобраны параметры модели материала пластического поведения бетона. В результате получены зависимости в запредельной области деформирования образцов в продольном направлении (рис. 8).

Определено, что основным показателем, характеризующим параметры модели пластического поведения дисперсно-армированного набрызгбетона

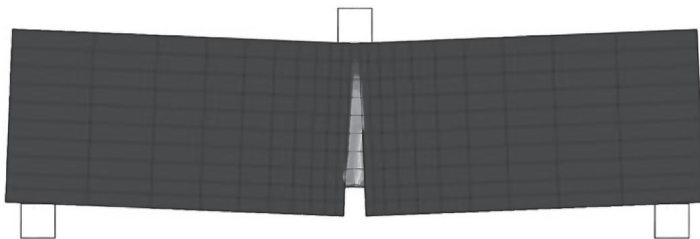


Рис. 7. Характер деформирования балочки при трехточечном изгибе по результатам численного моделирования

Fig. 7. Deformation behavior of bar in three-point bending test by numerical modeling results

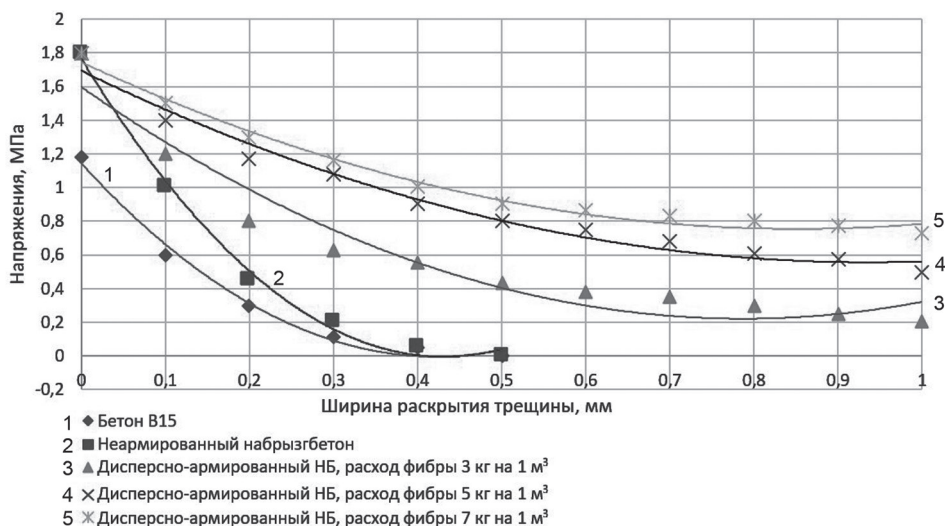


Рис. 8. Запредельная область деформирования бетона в продольном направлении при одноосном растяжении

Fig. 8. Post-limit deformation domain longitudinally concrete specimen in uniaxial tension

с накоплением повреждений, является показатель остаточной прочности $R_{e,j} = 0,46$. Исследования показали, что такое значение обеспечивает качественные характеристики дисперсно-армированного набрызгбетона.

Удовлетворительная сходимость показателей позволяет сделать вывод, что

дисперсно-армированная набрызгбетонная крепь обладает достаточной несущей способностью, а применение ее взамен монолитной бетонной крепи на рудниках является весьма перспективным направлением повышения технико-экономических показателей проходки выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Franzén T. Shotcrete for rock support: a summary report on the state of the art in 15 countries // Tunnelling and Underground Space Technology. 1993, vol. 8, no. 4, pp. 441 – 470.
2. Löfgren I. Fibre-reinforced concrete for industrial construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis. Ph.D. Thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg, 2005.
3. Зубков А. А., Латкин В. В., Неугомонов С. С., Волков П. В. Перспективные способы крепления горных выработок на подземных рудниках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № S1-1.
4. Bernardo G., Guida A., Mecca I. Advancements in shotcrete technology // WIT Transactions on The Built Environment. 2015, vol. 153, pp. 591 – 602. DOI: 10.2495/STR150491.
5. Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z., Perruzza P., Romualdi P. Precast tunnel segment in fiber reinforced concrete / Proceedings of Concrete Engineering for Excellence and Efficiency. 2011.
6. Голдобина Л. О., Синегубов В. Ю. Исследование свойств фибробетона при различных условиях набора прочности // Colloquium-Journal. – 2019. – № 13-3 (37). – С. 24 – 30.
7. Морозов В. И., Пухаренко Ю. В. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях // Вестник МГСУ. – 2014. – № 3.
8. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

9. EN 14488-3:2006 Испытания торкретбетона. Ч. 3: Определение прочности на изгиб (разрушающее напряжение при изгибе, остаточное сопротивление) образцов бетонной балки, армированной фиброй.
10. EN 14845-1:2007. Методы испытания фибры в бетоне. Ч. 1: Эталонный бетон.
11. EN 14845-2:2007. Методы испытания фибры в бетоне. Ч. 2: Воздействие на прочность бетона.
12. *Shotcreting in Australia: Recommended Practice*, 2008. Concrete Institute of Australia & AuSS, Sydney.
13. *Nguyen Tai Tien, Karasev M. A., Vilner M. A. Study of the stress-strain state in the sub-rectangular tunnel // Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, vol. 62, pp. 383–388. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_49.
14. *Smirnova O. M., Shubin A. A., Potseshkovskaya I. V. Strength and deformability properties of polyolefin macrofibers reinforced concrete // International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 20, pp. 9397 – 9404.
15. *Shubin A. A., Tulin P. K., Potseshkovskaya I. V. Research of the effect of the concrete reinforcement structure on the stress-strain state of structures // International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 8, no. 12, pp. 1742 – 1751.
16. *Heravi A. A., Smirnova O. M., Mechtcherine V. S. Effect of strain rate and fiber type on tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) // RILEM Bookseries*. 2018, vol. 15, no. 15, pp. 266 – 274.
17. *Smirnova O. M., Kharitonov A. M., Belentsov Y. A. Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2019, vol. 6, no. 4, pp. 407 – 417.
18. *Milad Hafezolzghorani, Farzad Hejazi, Ramin Vaghei, Mohd Saleh Bin Jaafar, Keyhan Karimzade Simplified damage plasticity model for concrete // Structural Engineering International*. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 68 – 78.
19. EN 14651-2007 Способ испытания для бетона с металлическими волокнами – определение предела прочности на растяжение при изгибе (предел пропорциональности, предел прочности на растяжение при изгибе).
20. *Belentsov Yu. A., Smirnova O. M., Kazanskaya L. F. Improvement of competitive edge of precast reinforced concrete by increasing the reliability level and quality control // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, no. 666, pp. 12037 – 12046.
21. *Grassl P., Xenos D., Nyström U., Rempling R., Gylltoft K. CDPM2: a damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete // International Journal of Solids and Structures*. 2013, vol. 50, no. 24, pp. 3805–3816. **PLAB**

REFERENCES

1. Franzén T. Shotcrete for rock support: a summary report on the state of the art in 15 countries. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1993, vol. 8, no. 4, pp. 441 – 470.
2. Löfgren I. *Fibre-reinforced concrete for industrial construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. Ph.D. Thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg, 2005.
3. Zubkov A. A., Latkin V. V., Neugomonov S. S., Volkov P. V. Perspective ways of fastening of excavations on underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. S1-1. [In Russ].
4. Bernardo G., Guida A., Mecca I. Advancements in shotcrete technology. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2015, vol. 153, pp. 591 – 602. DOI: 10.2495/STR150491.
5. Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z., Perruzza P., Romualdi P. Precast tunnel segment in fiber reinforced concrete. *Proceedings of Concrete Engineering for Excellence and Efficiency*. 2011.
6. Goldobina L. O., Sinegubov V. U., Investigation of the properties of fibroconcrete under various conditions of strength gain. *Colloquium-Journal*. 2019, no. 13-3 (37), pp. 24 – 30.

7. Morozov V. I., Pukhareno U. V. Efficiency of fiber reinforced concrete application in structures subjected to dynamic effects. *Vestnik MGSU*. 2014, no. 3. [In Russ].

8. *Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam. GOST 10180-2012 Betonny* [Concretes. Methods for determining the strength of control samples. State Standart 10180-2012]. [In Russ].

9. *EN 14488-3:2006 Ispytaniya torkretbetona. Ch. 3: Opredelenie prochnosti na izgib (razrushayushchee napryazhenie pri izgibe, ostatochnoe soprotivlenie) obraztsov betonnoy balki, armirovannoy fibroy* [EN 14488-3-2006 Testing sprayed concrete. Part 3: Flexural strengths (first peak, ultimate and residual) of fibre reinforced beam specimens]. [In Russ].

10. *EN 14845-1:2007. Metody ispytaniya fibry v betone. Ch. 1: Etalonnnyy beton* [EN 14845-1:2007. Test methods for fibres in concrete. Part 1: Reference concretes]. [In Russ].

11. *EN 14845-2:2007. Metody ispytaniya fibry v betone. Ch. 2: Vozdeystvie na prochnost' betona* [EN 14845-2:2007. Test methods for fibres in concrete. Part 2: Effect on concrete]. [In Russ].

12. *Shotcreting in Australia: Recommended Practice, 2008*. Concrete Institute of Australia & AuSS, Sydney.

13. Nguyen Tai Tien, Karasev M. A., Vilner M. A. Study of the stress-strain state in the sub-rectangular tunnel. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020, vol. 62, pp. 383–388. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_49.

14. Smirnova O. M., Shubin A. A., Potseshkovskaya I. V. Strength and deformability properties of polyolefin macrofibers reinforced concrete. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 20, pp. 9397–9404.

15. Shubin A. A., Tulin P. K., Potseshkovskaya I. V. Research of the effect of the concrete reinforcement structure on the stress-strain state of structures. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 8, no. 12, pp. 1742–1751.

16. Heravi A. A., Smirnova O. M., Mechtcherine V. S. Effect of strain rate and fiber type on tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC). *RILEM Bookseries*. 2018, vol. 15, no. 15, pp. 266–274.

17. Smirnova O. M., Kharitonov A. M., Belentsov Y. A. Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2019, vol. 6, no. 4, pp. 407–417.

18. Milad Hafezolghorani, Farzad Hejazi, Ramin Vaghei, Mohd Saleh Bin Jaafar, Keyhan Karimzade Simplified damage plasticity model for concrete. *Structural Engineering International*. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 68–78.

19. *EN 14651-2007 Sposob ispytaniya dlya betona s metallicheskimy voloknami – opredelenie predela prochnosti na rastyazhenie pri izgibe (predel proporsional'nosti, predel prochnosti na rastyazhenie pri izgibe)* [EN 14651–2007 Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)]. [In Russ].

20. Belentsov Yu. A., Smirnova O. M., Kazanskaya L. F. Improvement of competitive edge of precast reinforced concrete by increasing the reliability level and quality control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, no. 666, pp. 12037–12046.

21. Grassl P., Xenos D., Nyström U., Rempling R., Gylltoft K. CDPM2: a damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. *International Journal of Solids and Structures*. 2013, vol. 50, no. 24, pp. 3805–3816.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Туллин Павел Кириллович¹ – канд. техн. наук, доцент,
e-mail: Tulin_PK@pers.spmi.ru,

Очкуров Валерий Иванович¹ – канд. техн. наук, доцент,
e-mail: Ochkurov_VI@pers.spmi.ru,

Шубин Андрей Анатольевич¹ – канд. техн. наук, доцент,
e-mail: Shubin_AA@pers.spmi.ru,

Сотников Роман Олегович¹ — аспирант, e-mail: ross61@mail.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Сотников Р.О., e-mail: ross61@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*P.K. Tulin*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Tulin_PK@pers.spmi.ru,

*V.I. Ochkurov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Ochkurov_VI@pers.spmi.ru,

*A.A. Shubin*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Shubin_AA@pers.spmi.ru,

*R.O. Sotnikov*¹, Graduate Student, e-mail: ross61@mail.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: R.O. Sotnikov, e-mail: ross61@mail.ru.

Получена редакцией 20.07.2020; получена после рецензии 26.10.2020; принята к печати 10.07.2021.

Received by the editors 20.07.2020; received after the review 26.10.2020; accepted for printing 10.07.2021.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

(2020, № 12, СБ 48, 32 с.)

Oganesyan A.S., Agaonov V.V., Shoyduk Sh.G., Snigirev V.A., Gurkov A.A.

Показано, что особый практический интерес представляет комплекс, который формируется из возможностей нескольких альтернативных составляющих: традиционные пути повышения технико-экономической эффективности в результате оптимизации составляющих техники и технологии, использования комбинированных технологий отработки запасов угольных месторождений и использования цифровых технологических платформ. Сформированная таким образом цифровая геосистема реализует более совершенный и экономичный цикл угледобывающего и перерабатывающего производства. Теоретической основой методологического и научно-методического обеспечения обоснования параметров данной геосистемы и синтеза цифровых технологических систем в сложившихся экономических условиях должны составлять комплекс методов, предусматривающих наиболее полный учет характерных особенностей цифрового подхода и комбинированной отработки запасов угольных месторождений.

IMPROVING TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF COAL MINING INDUSTRIES IN MODERN CONDITIONS OF SUBSURFACE USE

Oganesyan A.S., Agaonov V.V., Shoyduk Sh.G., Snigirev V.A., Gurkov A.A.

It is shown that the complex is of particular practical interest, which is formed from the possibilities of several alternative components: traditional ways to increase technical and economic efficiency as a result of optimizing the components of equipment and technology, the use of combined technologies for mining coal deposits and the use of digital technological platforms. The digital geosystem formed in this way implements a more advanced and economical cycle of coal mining and processing production. The theoretical basis of methodological and scientific-methodological support for the substantiation of the parameters of this geosystem and the synthesis of digital technological systems in the current economic conditions should be a set of methods that provide for the most complete consideration of the characteristic features of the digital approach and combined mining of coal deposits.