

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-8-17

Алексеев В.А., *Баженова С.И.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ БЕТОННЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ НАБРЫЗГБЕТОНИРОВАНИЯ ПРИ СООРУЖЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. При сооружении подземных конструкций широко используется формирование бетонных конструкций методом набрызга. Технология набрызгбетонирования широко используется для крепления подземных выработок, при устройстве постоянных обделок тоннелей и коллекторов, в качестве элементов оболочек и несущих конструкций подземных сооружений городской инфраструктуры. Набрызгбетонирование позволяет широко варьировать форму и толщину конструкций подземных сооружений, позволяя исключать опалубочные (а в ряде случаев и арматурные) монтажные работы.

Целью работы являлась определение общих закономерностей развития технологии набрызгбетонирования, обзор существующих наработок в РФ по оптимизации составов набрызгбетона и выявление наиболее перспективных направлений по сделанным исследованиям.

В статье был проведен обзорный анализ создания набрызгбетонных конструкций с повышенными физико-механическими, а также технологическими параметрами должно вестись с учетом последних достижений в сфере строительного материаловедения. Приведены авторские исследования по оптимизации составов набрызгбетона, в которых применяются в качестве вяжущего модифицированные композиции с оптимально подобранным гранулометрическим и минералогическим составом и введение фибры в бетонную смесь. Благодаря использованию в подземных конструкциях с вмещающим грунтовым массивом различной степени устойчивости, требования к характеристикам набрызгбетона могут варьироваться в самых широких пределах. С учетом распространения «мокрого» способа набрызга (где готовая бетонная смесь подается к соплу с высокой скоростью) особые требования предъявляются к реологическим характеристикам смеси и деформативным характеристикам при изгибе (т.к. несущая способность сводчатые покрытия прямо пропорционально зависит от их способности выдерживать нагрузки в растянутых зонах) особенно для обделок сложных контуров.

Проведенный обзорный анализ позволил выявить значимость аспекта модификации вяжущих композиций для составов набрызгбетона, позволяющий повысить физико-механические и технические свойства набрызгбетонных смесей за счет оптимизации гранулометрического состава вяжущего вещества микронаполнителем с самостоятельной гидравлической активностью.

Ключевые слова: подземные конструкции, подземное строительство, набрызгбетон, композиционное вяжущее, микронаполнитель, оптимизация грансостава, фибра.

Расширение современных мегаполисов происходит за счет освоения новых территорий, высотного и подземного строительства. Крупнейшие города, столкнувшись с проблемой доступного присоединения новых территорий, растут за счет активного строительства подземных сооружений. Увеличивающаяся транспортная нагрузка на существующую инфраструктуру также вынуждает сооружать новые транспортные артерии под землей [1].

Необходимость возведения подземных конструкций (тоннелей, шахт, наклонных ходов, межтоннельных и притоннельных сооружений) в короткие сроки вызывает необходимость использования эффективных технологий и материалов, оптимизации технологических и конструктивных решений. Строительство в подземном про-

странстве является достаточно трудоемким и затратным процессом ввиду ограниченности рабочего пространства, трудной логистики и необходимости повышенных мер безопасности [2].

Одним из эффективных методов при строительстве подземных сооружений является сооружение конструкций из набрызгбетона, позволяющее исключить арматурные и опалубочные работы, и реализовать принцип восприятия нагрузок конструкции, совместно с грунтовым массивом [3].

Достоинства набрызгбетона активно проявляются при сооружении подземных конструкций:

- снижение общей толщины конструкции обделки и соответственно сечения выработки;

- отказ от арматурных работ и возможность непосредственного бетонирования в течение 2–3 часов после вскрытия породы;

- исключение тампонажных работ в заобделочное пространство железобетонных, металлических и чугунных обделок при традиционных методах проходки;

- возможность создания комбинированных конструкций (например, с эффективными гидроизолирующими слоями) в сочетании с разными видами крепления (при проектном обосновании) – анкерном, сеточно-армированном, арочном и т.п.;

- возведение в условиях подземного пространства конструкции крепи высокой степени долговечности, непосредственно работающей со вмещающим грунтовым массивом;

- потенциальная реализация укрепления забойной части проходки для максимального использования полного сечения выработки;

- возможность максимальной автоматизации и механизации процесса сооружения крепи в условиях сложных контуров и различного сечения в свету (что особенно эффективно при отказе от процессов армирования, требующих индивидуального изготовления сеток и каракасов).

Используемые в настоящее время методы проектирования составов бетонов в технологии набрызга не позволяют в полном объеме решать задачи по созданию эффективных конструкций с максимальной степенью использования свойств материала. Также стоит проблема повышения качества набрызгбетона в каждом конкретном случае с учетом технологичности процесса и логистики в подземном строительстве. Анализ исследований по получению набрызгбетона с повышенными свойствами подтверждает необходимость использования широкого спектра химических и органоминеральных добавок, специальных подборов рецептуры бетонной смеси, оптимизации технологии набрызгбетонирования [3, 4, 5, 6].

Как следует из обзора литературных источников важнейшим фактором, влияющим на свойства набрызгбетона, является характеристики используемого вяжущего вещества. В большинстве

случаев это портландцемент, широко представленный на рынке строительных материалов. Однако достижение требуемых свойств для высококачественного набрызгбетона требует повышенных расходов цемента, пластификаторов, стабилизаторов и других добавок [4, 6, 7].

Расчет набрызгбетонных конструкций ведется согласно нормативному документу ВСН 126-90 «Крепление выработок набрызгбетоном и анкерами при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов. Нормы проектирования и производства работ», толщина набрызгбетонной конструкции h_H рассчитывается из соотношения:

$$h_H \geq 0,9 \frac{m_1 m_2 m_3}{f_{кр.р}} \sqrt{u \frac{3\gamma_{гр}}{R_{bt}}} \quad (1)$$

где R_{bt} – расчетное сопротивление набрызгбетона на осевое растяжение по первой группе предельных состояний, МПа; m_1, m_2, m_3 – коэффициенты условий работы, u – размер возможного вывала; $\gamma_{гр}$ – объемный вес грунта вывала; $f_{кр.р}$ – расчетное значение коэффициента крепости грунта «в массиве». Т.е. за счёт повышения сопротивления на растяжения в 4 раза можно уменьшить толщину обделки в 2 раза.

В соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» (табл. Л.1.) для тяжелых бетонов с прочностями на сжатие от В15 до В40 значения коэффициентов перехода напряженного состояния от прочности по сжатию к осевому растяжению и растяжению при изгибе допускается принимать как 0,07 и 0,012. Для определения качественной характеристики набрызгбетона, показывающей повышение её несущей способности были приняты сравнение прочностных показателей бетонных образцов на сжатие и растяжение при изгибе согласно ГОСТ 10180-2012 с пересчётом возможной оптимизации параметров обделки.

Для повышения показателей бетонных смесей в плане показателей прочности на изгиб (и соответственно на осевое растяжение) традиционно применяется введение фибры в бетонную смесь и модификацию вяжущих веществ.

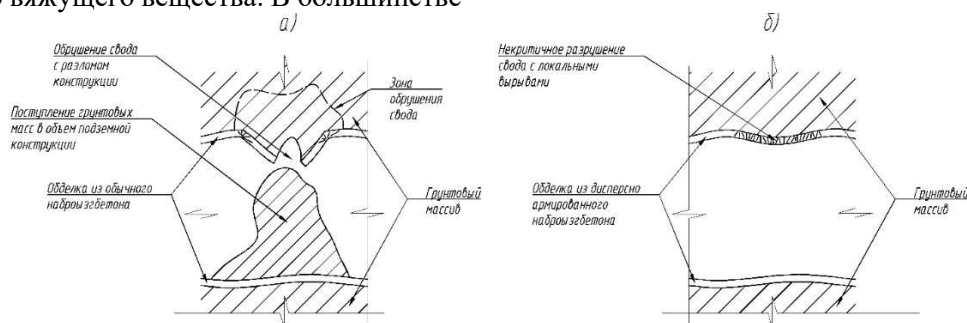


Рис. 1. Сравнение характера обрушения свода из набрызгбетона для традиционной крепи (а) и для набрызгбетонной крепи, армированной дисперсными волокнами (б)

Проведенный в статье обзорный анализ по более ранним исследованиям (в том числе и работ авторов) по вопросу получения и применения набрызгбетонирования позволил выявить следующий аспект: за счет оптимизированных характеристик бетонной смеси возможно повышение несущей способности набрызгбетонных конструкций или её использование в случае повышенных значений горного давления. Кроме того, при проектировании подземных конструкций должен учитываться факт возможной эвакуации при аварийной ситуации. Так благодаря комбинированному использованию фибронабрызгбетона на модифицированном вяжущем можно использовать безопасное создание набрызгбетонной отделки, которая в отличие от традиционной имеет невзрывной характер обрушения без вывалов и поступления вмещающей породы в эксплуатируемое пространство и позволяет некоторое время эксплуатировать подземное сооружение (см. рис. 1, 2) [6].

Авторами на базе кафедры «Технология вяжущих веществ и бетонов» МГСУ в целях повышения качественных показателей набрызгбетона было разработано композиционное вяжущее (КВ) для использования в технологии набрызга. Составы набрызгбетона на основе КВ комплексно исследовались с целью адаптации технологии и возможности применения разработанной модификации, с учетом, возможного введения дисперсных компонентов (пластиковой и металлической фибры). Использование на строительных объектах фибронабрызгбетона с композиционным вяжущим показывает высокую технологичность и повышенные количественно-качественные показатели материала, что подтверждается работами на опытных участках Московского метрополитена и зарубежными работами иностранных авторов [3, 6, 7].

Разработанное композиционное вяжущее имеет оптимизированный гранулометрический и минералогический состав, и по сравнению с портландцементом имеет сниженный объем межзерновых пустот. Обычный цемент имеет случайный зерновой состав, в котором часть мелких зерен расположена в межзерновом пространстве более крупных, а объемные зоны между мелкими зернами соответственно ничем не заполнены [8, 9]. В композиционном вяжущем (КВ) имеется более широкий спектр мелких зерен, которые заполняют те зоны, которые в обычном цементе являются воздушной порой.

За счет введения в состав стандартного портландцемента М500 диспергированных микронаполнителей не только существенно повышается плотность упаковки частиц вяжущего и улучша-

ются его свойства, обеспечивается плотная и качественная контактная зона между растворной частью и подложкой [10, 11]. Особенностью предлагаемого микронаполнителя является воспроизводимый плавный гранулометрический состав, постоянство физико-химических свойств и способность к самостоятельному гидратационному твердению. Иные типы микронаполнителей являются отходами различных производств или добываются из природных материалов, характеризуются нестабильной гранулометрией, непостоянными физико-химическими свойствами, не обладают сколь либо значимой самостоятельной способностью к гидратационному твердению, требуют построения сложных моделей расчёта составов с учетом их дисперсности [12]. Используемый наполнитель двух модификаций «Экстра» и «Ультра» в составе КВ представляет собой гидравлически активный тонкозернистый порошок, изготавливаемый методом воздушного сепарирования предварительно размолотых до высокой удельной поверхности подобранных минеральных компонентов ($d_{95}=5,5$ и $8,5$ мкм. и содержание частиц менее $0,1$ мкм. до 10 и 5 % соответственно).

В качестве базового вяжущего применялся портландцемент М500Д0 $S_{уд}=3025$ см²/гр. Активный микронаполнитель имел удельную поверхность $S_{уд}=16500$ и 22500 см²/гр. В качестве мелкого заполнителя использовались кварцевые пески ($M_{кр}=2,4; 1,8; 0,9$). Для повышения удобоукладываемости смеси, при заданных водовязущих отношениях, использовались пластифицирующая добавка на основе поликарбоскилатных эфиров. Испытания образцов производились в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Использование микронаполнителя с заданными гранулометрическими параметрами зерен позволяет заполнять межзерновое пространство гранул стандартной фракции портландцемента частицами с размерами, сравнимыми с объемом образованной поры. При подборе состава композиционного вяжущего также должно учитываться максимальное заполнение межзернового пространства микронаполнителем в заданном объеме без его превышения с исключением эффекта расклинивания крупных частиц. Содержащиеся в наполнителе наночастицы в свою очередь заполняют самые мелкие поры и способствуют уплотнению структуры на микроуровне [11].

Было отмечено, что пластичность смеси увеличивается и повышается её связность, также улучшается сцепление свежего бетона с подлож-

кой и соседними слоями при набрызге, что позволяет существенно повысить качество конструкции. Составы на КВ отличались увеличенными прочностными показателями и сниженной проницаемостью. Также был выполнен комплекс исследований составов и свойств мелкозернистых (безщебёночных) бетонов для условий набрызгбетонирования с учетом местной сырьевой базы кварцевых песков с различным модулем крупности.

На подвижность бетонных смесей оказывает влияние модуль крупности ($M_{кр}$) песка. Как показано в табл. 1 при понижении $M_{кр}$ песка снижается прочность и пластичность бетонной смеси, что объясняется повышением необходимого количества воды затворения для полного смачивания всех зерен инертного заполнителя. При использовании композиционного вяжущего повышается прочность и снижается количество воды, необходимое для обеспечения требуемой удобоукладываемости смеси.

Таблица 1

Зависимость увеличения подвижности бетонной смеси и прочности на сжатие от модуля крупности мелкого заполнителя, содержания и типа микроцемента

№ п/п	Вяжущее	ПЦ-500, %	Мн Экстра ($d_{95}=5,5$ мкм.), %	Мн Ультра ($d_{95}=8,5$ мкм.), %	$M_{кр}$ песка	Диаметр распыла, мм.	Прочность бетона на сжатие, МПа
1	ПЦ-500	100	–	–	0,9	245	41,2
2	КВ-1	85	–	15	0,9	270	46,5
3	КВ-2	85	15	–	0,9	290	51,1
4	ПЦ-500	100	–	–	1,9	255	49,5
5	КВ-1	85	–	15	1,9	275	53,5
6	КВ-2	85	15	–	1,9	300	57,0
7	ПЦ-500	100	–	–	2,4	270	53,7
8	КВ-1	85	–	15	2,4	315	58,6
9	КВ-2	85	15	–	2,4	330	61,1

Подземные конструкции ввиду своих особенностей имеют разнонаправленно действующие нагрузки по всей внешней объемной поверхности, что в некоторых случаях заставляет материал конструкций работать не только на сжатие,

но и на растяжение, изгиб, сдвиг и т.д. Как известно бетон хорошо работает на сжатие и плохо на изгиб и растяжение.

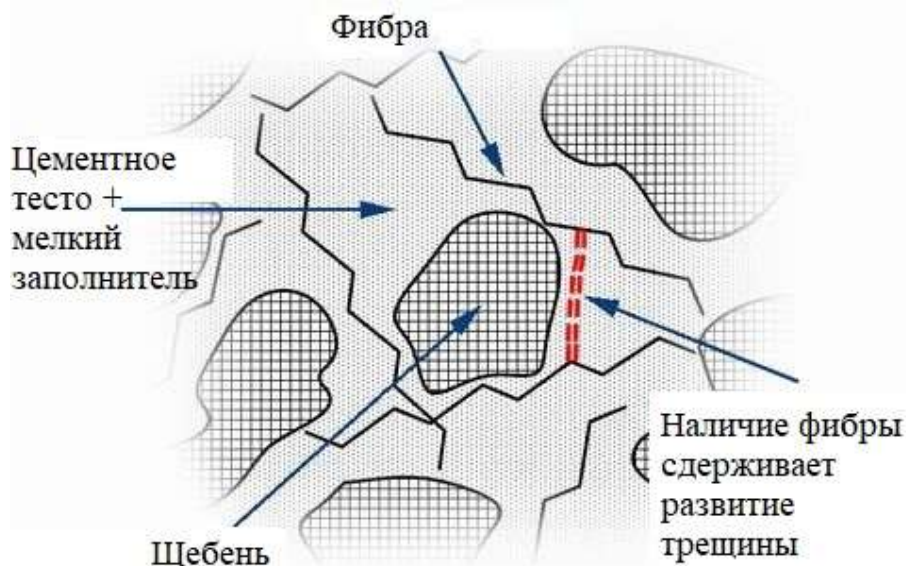


Рис. 2. Механизм повышения трещиностойкости набрызгбетонной смеси при добавлении фибры в исходную готовую бетонную смесь (Источник <https://1beton.info/proizvodstvo/rabota/armirovanie/kak-pravilno-armirovat-beton-posledovatelnost-poleznye-sovet>)

Поэтому в подземных конструкциях необходимо повышать деформационные показатели набрызгбетона или предусматривать соответ-

ствующее армирование, что удорожает и осложняет работы в ограниченных подземных условиях. В этой связи эффективным способом повышения качества конструкций из набрызгбетона,

является комбинация использования не только композиционных вяжущих, но и расширяющихся компонентов, химических добавок и введение в состав бетонной смеси фибры различного состава [13, 14]. Это обеспечивает повышенную

прочность набрызббетона при растяжении и изгибе, повышенную трещиностойкость, а также увеличивает водонепроницаемость и долговечность [15, 16].

Таблица 2

Прочность на растяжение при изгибе мелкозернистого фибронабрызгбетона на основе композиционного вяжущего

№ п/п	Вяжущее	ПЦ-500, %	Мн Экстра (d ₉₅ =5,5 мкм.), %	Мн Ультра (d ₉₅ =8,5 мкм.), %	Фибра	Прочность бетона на изгиб, МПа
1	ПЦ-500	100	–	–	без фибры	6,8
2	КВ-1	85	–	15	без фибры	8,5
3	КВ-2	85	15	–	без фибры	9,1
4	ПЦ-500	100	–	–	полипропилен	8,9
5	КВ-1	85	–	15	полипропилен	11,9
6	КВ-2	85	15	–	полипропилен	13,1
7	ПЦ-500	100	–	–	сталь	12,7
8	КВ-1	85	–	15	сталь	15,9
9	КВ-2	85	15	–	сталь	16,7

При использовании дисперсного армирования синтетическими или металлическими волокнами можно добиться снижения материалоемкости бетонных конструкций, исключения арматурных работ и производства армокаркасов, возведения в более короткие сроки. Таких результатов возможно достичь при замене армирования в традиционных железобетонных конструкциях стандартных элементов (каркасов, сочленения

стержней и сеток) на дисперсное армирование, и некоторой переналадке технологии при приготовлении бетонных смесей за счет наличия дополнительных ёмкостей фиброволокна. Добавление фиброволокна можно дозировать и непосредственно загружать как в сухие смеси для набрызга, так и в готовые бетонные составы в условиях действующего строительного участка.

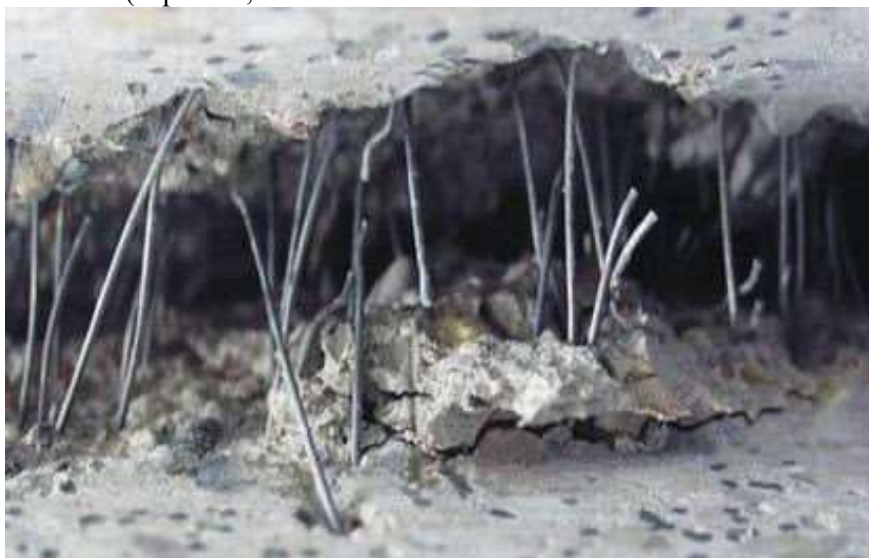


Рис. 3. Пример механизма разрушения фибронабрызгбетона при превышении предела критической нагрузки, характерной для неармированных образцов (заметен процесс сдерживания фибры от критического «взрывного» отрыва для образцов с дисперсным армированием) – увеличение x100
(Источник: <http://masters.donntu.org/2015/igg/barsuk/library/article2.htm>)

С целью повышения качественных показателей набрызгбетона, в его состав вводили фибру: полипропиленовую фибру «ПолиАрм» – 8 кг/м³ (длина – 50 мм, толщина – 0,6 мм, ширина – 1,2 мм.) и стальную фибру «Dramix 3D 45/50BL» – 85 кг/м³ (длина – 50 мм, толщина – 1,05 мм).

Введение фибры в состав бетона на композиционном вяжущем и её распределение в системе, позволяет повысить трещиностойкость, деформативные характеристики и долговечность бетона [3, 17]. Также были проведены испытания образцов бетона на мелком заполнителе Мкр=1,9

с отношением П/Ц=1,5; В/Ц=0,4; дозировка гиперпластификатора – 0,3÷1,5 % от массы цемента.

В целях изучения микроструктуры были выполнены комплексные исследования с применением электронного сканирующего микроскопа XL 30 ESEM-FEG. Были исследованы образцы гидратированного вяжущего и контактные зоны «заполнитель-фибра-вяжущее». В процессе исследований было отмечено достаточно равномерное распределение фибры в объеме цементного камня и бетона, в объеме композиционного

вяжущего заметны тонкие новообразования и частично непрореагировавшие частицы мелкодисперсных частиц (см. рис. 4).

В процессе вовлечения в гидратацию более мелких составляющих вяжущего вещества создавалась более плотная упаковка цементного камня и контактной зоны [3]. В зоне «вяжущее-фибра» выделяются гидратированные дисперсные частицы микрочастиц, обеспечивающие плотное прилегание фибры с вяжущим.

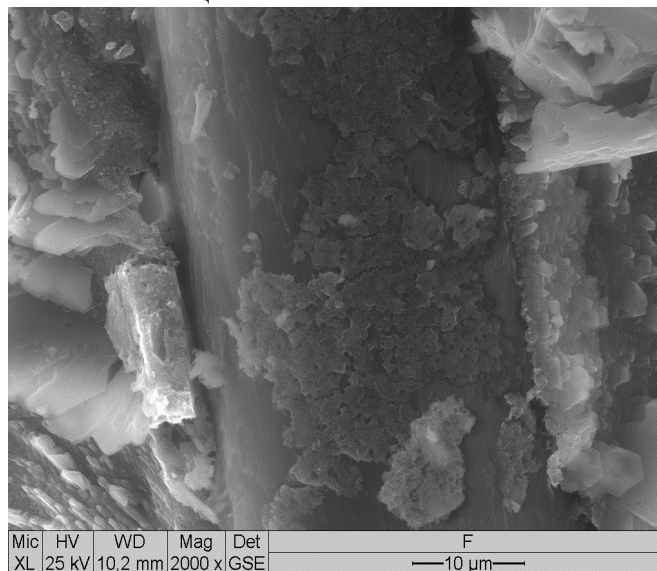


Рис. 4. Контактная зона гидратированного композиционного вяжущего и стальной фибры – увеличение $\times 2000$

В результате обработки ряда экспериментальных данных авторов [3, 5, 6] и табл. 1, 2 было установлено, что формирование структуры бетона, величина общей пористости, а также параметры капиллярно-пористой структуры на макро- и микроуровне зависят не только от величины водовяжущего отношения и степени гидратации, но и от вида микрозаполнителей. При этом микрозаполнитель оценивается не только по тонкости измельчения и величине удельной поверхности, но и по характеристике его гранулометрического и минерального состава. В результате опытов установлено, что оптимизация гранулометрического состава вяжущего повышает физико-технические свойства бетона на его основе, что согласуется с теоретическими представлениями критериев регулирования свойств дисперсных систем [6, 7, 8]. Полученные результаты были оформлены соответствующей заявкой на изобретение с получением положительного решения и защищены соответствующим патентом [18].

На подвижность до определенного предела также оказывает влияние модуль крупности (Мк) песка. В таблице 1 приведены результаты испытаний, из которых следует, что при повышении модуля крупности песка удобоукладываемость

смеси возрастает. Однако следует учитывать, что при дальнейшем повышении Мкр песка повышается межзерновая пустотность инертного заполнителя, что требует повышения расхода вяжущего или заполнения возникающих пустот фракциями более мелкого инертного заполнителя. При мокром способе набрызга (основной способ сооружения в закрытых выработках ввиду сильного пыления при сухом способе) в основном используются достаточно подвижные смеси, которые позволяют транспортировать её по технологическим трубопроводам набрызг-установки и равномерно наносить её на поверхность (бетонные смеси низкой подвижности склонны к комкованию при нанесении мокрым способом и неровной поверхности набрызгбетонной конструкции).

При пересчете показателей характеристик бетонных смесей по формуле (1) и соответствующих коэффициентов пересчета по ГОСТ 10180-2012 можно сделать вывод что набрызгбетон при модифицировании вяжущего и дисперсном армировании позволяет снизить толщину обделки на 35–65 %, или допустить использование при более высоких темпах роста горного давления за счет общего повышения прочностных показателей и применять в более неустойчивых грунтах.

Кроме того можно констатировать что дисперсное армирование набрызгбетона позволяет повысить безопасность подземных сооружений за счет исключения «взрывного» характера обрушения свода и стеновых конструкций из фибронабрызгбетона и увеличения времени эвакуации.

Применение добавки, способной к самостоятельному гидравлическому твердению на основе микроцемента создает более плотную контактную зону «фибра-цементный камень», повышает прочностные показатели набрызгбетона и его эксплуатационную надежность.

Проведенный в статье обзорный анализ (в.т.ч результатов ранних исследований авторов) позволяет сделать следующие выводы:

1. Возможно получение составов мелкозернистого набрызгбетона с повышенной прочностью на растяжение при изгибе до 10 МПа, что оптимизирует возможности проектирования набрызгбетонных конструкций.

2. Введение в состав базового портландцемента микронаполнителя с высокой степенью самостоятельной гидравлической активности ($d_{95} \leq 5,5$ мкм, $d_{10} \leq 0,1$ мкм) в количестве 15–21 %, позволяет повысить подвижность смеси и прочность набрызгбетона.

3. При совместном введении в состав композиционного вяжущего и фибры улучшаются физико-механические и технологические свойства фибронабрызгбетона: удобоукладываемость смеси, предел прочности на изгиб и сжатие.

4. Исследования микроструктуры бетона на основе композиционного вяжущего с микроцементными позволило установить качественную контактную зону как стальной, так и полипропиленовой фибры с цементным камнем, повышение плотности упаковки композиционного вяжущего, что является главной предпосылкой для получения конструкций с повышенной прочностью и долговечностью.

5. Комбинирование методов модифицирования бетонных смесей, используемых при набрызге и введения в их состав фиброволокон позволяет снижать толщину обделок, применять их в грунтах с повышенными критериями горного давления, повысить безопасность эксплуатации в аварийных ситуациях что особенно важно для подземных сооружений в условиях крупных городов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alan Bloodworth, Jiang Su. Numerical analysis and capacity evaluation of composite sprayed concrete lined tunnels // *Underground Space*. 2018.

Vol. 3, Iss. 2. Pp. 87–108. DOI: 10.1016/j.undsp.2017.12.001.

2. Isaac Galobardes, Sergio H. Cavalaro, Chris I. Goodier, Simon Austin, Ángel Rueda. Maturity method to predict the evolution of the properties of sprayed concrete // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 357–369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.038.

3. Алексеев В.А., Харченко А.И., Соловьев В.Г., Никоноров Р.Н. Набрызгбетон в шахтном строительстве // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. №7 (106). С. 780–787. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.780-787.

4. Nicolas Ginouse, Marc Jolin. Mechanisms of placement in sprayed concrete // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 58. Pp. 177–185. DOI: 10.1016/j.tust.2016.05.005

5. Алексеев В.А., Баженов Ю.М., Баженова С.И., Баженова О.Ю., Бисембаев Р.С., Мирончук Н.С. Добавки с самостоятельной гидравлической активностью для набрызгбетона // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2018. № 8 (1008). С. 61–63.

6. Alekseev V.A., Bazhenov Yu.M., Bazhenova S.I., Bazhenova O.Yu., Golovashchenko N.A., Mironchuk N.S. Modified binder for sprayed concrete // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2018. №5 (1005). С. 18–19.

7. Isaac Galobardes, Cesar L. Silva, Antonio Figueiredo, Sergio H. P. Cavalaro, Chris I. Goodier. Alternative quality control of steel fibre reinforced sprayed concrete (SFRSC) // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 223. Pp. 1008–1015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.003.

8. Белов В.В., Образцов И.В. Компьютерное оптимизирование зерновых составов строительных композитов на основе цементно-минеральных смесей // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. №3. С. 172–178.

9. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Белов В.В., Бурьянов А.Ф. Гранулометрический состав как критерий регулирования свойств дисперсных систем // *Строительные материалы*. 2013. №1. С. 64–65.

10. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Соотношение размера частиц в полидисперсных структурах как первый шаг к оптимизации составов композиционных вяжущих // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 2 (25). С. 7.

11. Федюк Р.С., Баранов А.В., Хроменок Д.В., Зеленский И.Р., Ким С.В. Уплотнение структуры цементного камня в бетоне за счет эффективного использования композиционного вяжущего // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. Т. 21. № 3. С. 195–206.

12. Тарарушкин Е.В. Восстановление плотности распределения частиц дисперсных материалов методом окна Парзена-Розенблатта // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. №7 (118). С. 855–862. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.7.855-862.

13. Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф., Елсуфьева М.С. Особенности производства сталефибробетонных изделий и конструкций // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 18–21.

14. Masoud Ghahremannejad, Maziar Mahdavi, Arash Emami Saleh, Sina Abhaee, Ali Abolmaali. Experimental investigation and identification of single and multiple cracks in synthetic fiber concrete beams // Case Studies in Construction Materials, 2018. Vol. 9. Article e00182. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00182.

15. Ozkan Sengul. Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers // Construction and Building Materials,

2018. Vol. 186. Pp. 1082–1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.042

16. Yu Wen Liu, Shih Wei Cho. Study on application of fiber-reinforced concrete in sluice gates // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 176. Pp. 737–746.

17. Nurtdinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete // MATEC Web of Conferences "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016" 2016. С. 04026. DOI: 10.1051/mateconf/20168604026.

18. Патент на изобретение RUS 2622057 27.10.2015. Сухая смесь для приготовления бетона и строительного раствора и применение сухой смеси. Алексеев В.А., Харченко И.Я., Харченко А.И., Матвеев К.Н.

Поступила в октябре 2019 г.

© Алексеев В.А., Баженова С.И., 2020

Информация об авторах

Алексеев Вячеслав Александрович, заведующий лабораторией кафедры «Технологии вяжущих веществ и бетонов». E-mail: 634586@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Баженова Софья Ильдаровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии вяжущих веществ и бетонов». E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Alekseev V.A., *Bazhenova S.I.

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com*

OPTIMIZATION OF CONCRETE COMPOSITIONS FOR SPRAYED CONCRETE IN THE CONSTRUCTION OF UNDERGROUND STRUCTURES

Abstract. *The formation of concrete structures by spraying method is widely used in the construction of underground structures. The technology of sprayed concrete (otherwise known as shotcrete) is widely used for fixing underground development, in the device of permanent lining of tunnels and collectors, as elements of shells and supporting structures of underground structures of urban infrastructure. Sprayed concrete makes it possible to widely vary the shape and thickness of design of underground structures, allowing to eliminate formwork and in some cases reinforcing. The creation of shotcrete structures with increased physical and mechanical properties, as well as technological parameters should be carried out taking into account the latest achievements in the field of construction materials science. The authors investigate the optimized compositions of sprayed concrete in which modified compound with optimally selected granulometric and mineralogical composition and the introduction of fiber into the concrete mixture are used as a binder. Due to the use of different degrees of stability in underground structures with a containing soil mass, the requirements for the characteristics of the spray tone can vary widely. Taking into account the wet spraying process (when the finished concrete mixture is fed to the nozzle at a high speed), special requirements are placed on the rheological characteristics of the mixture and the deformation characteristics during bending (since the bearing capacity of the vaulted coatings depends directly on their ability to withstand loads in stretched zones), especially for lining of complex contour.*

Keywords: *underground structures, underground construction, sprayed concrete, shotcrete, composite binder, microfill, optimization.*

REFERENCES

1. Alan Bloodworth, Jiang Su. Numerical analysis and capacity evaluation of composite sprayed concrete lined tunnels. *Underground Space*. 2018. Vol. 3, Iss. 2. Pp. 87–108. DOI: 10.1016/j.undsp.2017.12.001.
2. Isaac Galobardes, Sergio H. Cavalaro, Chris I. Goodier, Simon Austin, Angel Rueda. Maturity method to predict the evolution of the properties of sprayed concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 357–369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.038.
3. Alekseev V.A, Kharchenko A.I., Solovyev V.G., Nikonorov R.N. Nabry`zgbeton v shaxtnom stroitel`stve [Shotcrete in mine construction]. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017. Vol. 12. №7 (106). Pp. 780–787. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.780-787. (rus)
4. Nicolas Ginouse, Marc Jolin. Mechanisms of placement in sprayed concrete // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 58, 2016, Pp. 177–185. DOI: 10.1016/j.tust.2016.05.005.
5. Alekseev V.A., Bazhenov Ju.M., Bazhenova S.I., Bazhenova O.Ju., Bisembaev R.S., Mironchuk N.S., Additives with independent hydraulic activity for sprayed concrete. *Bulletin of construction machinery*. 2018. No. 8 (1008). Pp. 61–63. (rus)
6. Alekseev V.A., Bazhenov Yu.M., Bazhenova S.I., Bazhenova O.Yu., Golovashchenko N.A., Mironchuk N.S. Modified binder for sprayed concrete. *Bulletin of construction machinery*. 2018. No. 5 (1005). Pp. 18–19.
7. Isaac Galobardes, Cesar L. Silva, Antonio Figueiredo, Sergio H.P. Cavalaro, Chris I. Goodier. Alternative quality control of steel fibre reinforced sprayed concrete (SFRSC). *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 223. Pp. 1008–1015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.003.
8. Belov V.V., Obratsov I.V. Komp`yuternoe optimizirovanie zernovy`x sostavov stroitel`ny`x kompozitov na osnove cementno-mineral`ny`x smesey [Computer optimization of grain composition building composites based on cement-mineral mixtures]. *Proceedings of the Kazan State Academy of Architecture and construction [Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta]*. 2014. No. 3. Pp. 172–178. (rus)
9. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Belov V.V., Buryanov A.F. Granulometric composition as a criterion for regulating the properties of disperse systems. *Building materials*. 2013. No. 1. Pp. 64–65. (rus)
10. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. The ratio of particle size in polydisperse structures as the first step to optimize the composition of composite binders. *Engineering Bulletin of Don [Inzhenerny`j vestnik Dona]*. 2013. No. 2(25). Pp. 7. (rus)
11. Fediuk R.S., Baranov A.V., Khromenok D.V., Zelenskiy I.R., Kim S.V. Uplotnenie struktury` cementnogo kamnya v betone za schet e`ffektivnogo ispol`zovaniya kompozitsionnogo vyazhushhego [Cement stone structure compaction with composite binder]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel`nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. Vol. 21. No. 3. Pp. 195–206. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-195-206. (rus)
12. Tararushkin E.V. Vosstanovlenie plotnosti raspredeleniya chastits dispersnykh materialov metodom okna Parzena-Rozenblatta [Reconstructing distribution density of particles for disperse materials by the Parzen–Rozenblatt window method]. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018. Vol. 13, Iss.7 (118). Pp. 855–862. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.855-862. (rus)
13. Solovyev V.G., Buryanov A.F., Elsfyeva M.S. Features of production of steel-fiber concrete products and constructions. *Building materials*. 2014. No. 3. Pp. 18–21. (rus)
14. Masoud Ghahremannejad, Maziar Mahdavi, Arash Emami Saleh, Sina Abhaee, Ali Abolmaali. Experimental investigation and identification of single and multiple cracks in synthetic fiber concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol.9. Article e00182. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00182.
15. Ozkan Sengul. Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 186. Pp. 1082–1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.042
16. Yu Wen Liu, Shih Wei Cho. Study on application of fiber-reinforced concrete in sluice gates. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 176. Pp. 737–746. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.004
17. Nurtdinov M., Solovyev V., Panchenko A. Influence of composite fibers on the properties of heavy concrete. *MATEC Web of Conferences "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016" 2016*. 04026. DOI: 10.1051/mateconf/20168604026.
18. The patent for invention RUS 2622057 on 27.10.2015. Dry mix for the preparation of concrete and mortar and the use of dry mix. Alekseev V.A., Kharchenko I.Ya., Kharchenko A.I., Matveev K.N.

Information about the authors

Alexeev, Vyacheslav A. Chief laboratory. E-mail: 634586@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Bazhenova, Sofya I. PhD, Associate Professor. E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Received in October 2019

Для цитирования:

Алексеев В.А., Баженова С.И. Оптимизация бетонных составов для набрызгбетонирования при сооружении подземных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. №1. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-8-17

For citation:

Alekseev V.A., Bazhenova S.I. Optimization of concrete compositions for sprayed concrete in the construction of underground structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 1. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-8-17