

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 620.3:666.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1565-1576

Влияние дисперсного армирования на макро- и микроструктуру сухих строительных смесей с применением активации

Владимир Александрович Перфилов, Дмитрий Александрович Ляшенко,
Максим Евгеньевич Николаев

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время нашли широкое распространение сухие строительные смеси на базе гидравлических вяжущих материалов. Применение сухих смесей многогранно и связано в основном с приготовлением растворов и мелкозернистых бетонов. Указанные смеси получают путем регулирования реологических и физико-механических свойств за счет введения модифицирующих добавок и микронаполнителей в виде стеклянных микросфер.

Материалы и методы. Для регулирования свойств смеси на микроскопическом уровне использовались фибровые полимерные и базальтовые волокна, создавая тем самым упрочненную армированную микроструктуру затвердевшего мелкозернистого бетона. Подобраны составы сухих смесей на основе полимерных и базальтовых фибровых волокон с применением суперпластификатора и аппретированных полых стеклянных микросфер марки МС-ВП-А9 в количестве 10 %. Сухая смесь на базе указанного состава с использованием суперпластификаторов, стеклянных микросфер, а также базальтовой или полимерной фибры приготавливается путем перемешивания и измельчения в линейно-индукционном вращателе, который имеет показатель индуктивности переменного поля 0,2 Тл и частоту 50 Гц. Обработка смеси осуществляется в течение 240 с. Полимерные и базальтовые волокна вводились в сухую смесь раздельно, т.е. в каждом составе использовался только один из двух представленных видов волокон.

Результаты. Активированные в электромагнитном поле сухие смеси затворялись водой в количестве, необходимом для получения растворов равной подвижности. Приготовление раствора производилось в течение 4–5 мин, при этом полученные смеси имели повышенную пластичность и однородность с равным количеством воды затворения в сравнении с контрольными составами без применяемых базальтовых или полимерных волокон.

Выводы. Анализ экспериментальных данных показал, что оптимальная концентрация суперпластификатора составляет 0,5 % от массы цемента, при которой наблюдается максимальный прирост прочности. Установлено, что оптимальное количество фиброволокна (как базальтового, так и полипропиленового) — 1,4 кг/м³. При этом базальтовое волокно обеспечивает увеличение прочности при сжатии на 28 % и при изгибе на 45 %, а полипропиленовое — на 29 и 42 % соответственно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фиброволокна, сухие строительные смеси, электромагнитная активация, стеклянные микросферы, суперпластификатор, мелкозернистый бетон

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Перфилов В.А., Ляшенко Д.А., Николаев М.Е. Влияние дисперсного армирования на макро- и микроструктуру сухих строительных смесей с применением активации // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1565–1576. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1565-1576

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Александрович Ляшенко, caf_ngs@mail.ru.

The effect of dispersed reinforcement on the macro- and microstructure of dry building mixes using activation

Vladimir A. Perfilov, Dmitry A. Lyashenko, Maksim E. Nikolaev
Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Dry building mixes based on hydraulic binders are currently widely used. The use of dry mixes is multifaceted and is mainly associated with the preparation of solutions and fine-grained concrete. These mixes are obtained by regulating rheological and physical-mechanical properties by introducing modifying additives and microfillers in the form of glass microspheres.

Materials and methods. Polymer and basalt fibre were used to regulate the properties of the mix at the microscopic level, thereby creating a strengthened reinforced microstructure of hardened fine-grained concrete. The compositions of dry mixes based on polymer and basalt fibre were selected using a superplasticizer and 10 % coated hollow glass microspheres of the MS-VP-A9 brand. A dry mix based on the specified composition with the use of superplasticizers, glass microspheres, and basalt or polymer fibre is prepared by mixing and grinding in a linear induction rotator, which has an alternating field inductance of 0.2 T and a frequency of 50 Hz. The mixture is processed for 240 seconds. Polymer and basalt fibres were introduced into the dry mix separately, i.e. only one of the two presented types of fibres was used in each composition.

Results. Dry mixes activated in an electromagnetic field were mixed with water in the amount necessary to obtain solutions of equal mobility. The solution was prepared for 4–5 minutes, while the resulting mixtures had increased plasticity and homogeneity with an equal amount of mixing water, in comparison with the control compositions, without the use of basalt or polymer fibres.

Conclusions. The influence of the type and quantity of fibre on the physical and mechanical properties of fine-grained concrete obtained on the basis of dry building mixtures activated by electromagnetic treatment was determined.

KEYWORDS: fibre, dry building mixes, electromagnetic activation, glass microspheres, superplasticizer, fine-grained concrete

FOR CITATION: Perfilov V.A., Lyashenko D.A., Nikolaev M.E. The effect of dispersed reinforcement on the macro- and microstructure of dry building mixes using activation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1565-1576. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1565-1576 (rus.).

Corresponding author: Dmitry A. Lyashenko, caf_ngs@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Применение сухих строительных смесей для приготовления мелкозернистого бетона, используемого при производстве монолитных напольных покрытий, штукатурных растворов, а также тротуарной плитки, бордюрного камня, брусчатки и других мелкоштучных изделий, при эксплуатации сталкивается с проблемами устойчивости к усадочным трещинам, водо- и морозостойкости, повышения стойкости к механическим и химическим воздействиям [1–7]. В условиях современной промышленности и гражданского строительства актуальность приобретает создание материалов с улучшенными физико-механическими свойствами, способных выдерживать значительные нагрузки и воздействие различных агрессивных факторов.

Для улучшения физико-механических свойств мелкозернистого бетона необходимо модифицировать его структуру на макро- и микроскопическом уровнях, поскольку между ними существует тесная взаимосвязь [8–11]. Сухие строительные смеси становятся перспективным направлением развития строительной индустрии. Их применение позволяет получать материалы с заданными характеристиками, включая определенную подвижность, вододерживающую способность и отсутствие расслаиваемости. Особое внимание уделяется разработке составов с относительно малой плотностью, высокими показателями прочности и трещиностойкости.

Традиционные методы приготовления строительных смесей уже не удовлетворяют растущим требованиям строительной отрасли. Существующие технологии смешивания в различных аппаратах (барбанных, лопастных, центробежных) не обеспечивают энергоэффективности и качества активации компонентов. В связи с этим возникает потребность в разработке инновационных подходов к приготовлению строительных смесей.

Инновационные технологии приготовления сухих смесей открывают новые возможности для улучшения качества строительных материалов. Одним из перспективных направлений является применение электромагнитного воздействия на сухие компоненты растворов. Этот метод дает возможность значительно повысить реакционную способность

смеси и улучшить ее физико-механические характеристики.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания строительных материалов нового поколения, отвечающих современным требованиям строительной отрасли. Разработка оптимальных составов сухих смесей и совершенствование технологий их приготовления — важный шаг в развитии строительной индустрии.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что мелкозернистые бетоны с включением фиброволокна демонстрируют улучшение физико-механических свойств. Наряду с этим фиброволокна влияют на макроструктуру мелкозернистого бетона за счет перераспределения внутренних напряжений, укрепляя «зону контакта», соединяющую цементную матрицу и мелкий наполнитель [12–14]. В результате образуется макроструктура, пространственно-армированная фиброволокном, что повышает устойчивость мелкозернистого бетона к образованию и развитию трещин. Армирование мелкозернистого бетона дисперсными волокнами оказывает непосредственное влияние на его микроструктуру. Во время гидратации цементного камня гидросиликаты кальция концентрируются на поверхности фибры. Таким образом, снижается пористость при значительном уменьшении крупных капиллярных пор, повышается водо- и морозостойкость, а также прочность мелкозернистого бетона.

Можно выделить основные вопросы, касающиеся развития технологий сухих строительных смесей:

- разработка оптимальных составов сухих смесей;
- изучение влияния различных добавок на свойства материалов;
- исследование эффективности различного вида активации компонентов;
- определение основных физико-механических характеристик полученных материалов;
- оценка практической значимости разработанных составов.

Решение этих задач позволит создать новые материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками, отвечающие современным требованиям строительной отрасли.

Цель исследования — определение влияния различных типов фиброволокон на физико-механические характеристики бетонов, полученных из сухих строительных смесей с применением активации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выявления влияния дисперсного армирования на макро- и микроструктуру мелкозернистого бетона использовано полипропиленовое фиброволокно ВСМ (волокно строительное микроармирующее) длиной 12 мм и диаметром 20 мкм с пределом прочности при растяжении до 500 МПа, произведенное компанией ООО «Си Айрлайн» по ТУ 2272-006-13429727–2007, а также базальтовое фиброволокно длиной 12 мм и диаметром 13 мкм с пределом прочности при растяжении до 2000 МПа, произведенное в соответствии с ТУ В В.2.7-26.8-32673353-001–2007. Преимущество полимерных и базальтовых волокон перед металлическими заключается в их малом весе, плотности, высокой коррозионной стойкости и прочности, а также относительно низкой стоимости. Они способствуют в процессе смешивания образованию реологически однородной, пластичной и неразделимой смеси. В ходе предыдущих исследований [12–14] было установлено, что на физико-механические параметры в наибольшей степени влияет количество вводимой фибры, которое варьируется в диапазоне от 0,6 до 2,0 кг/м³ бетонной смеси.

В состав смеси входили: портландцемент производства ОАО «Осколцемент» марки ЦЕМ I 42,5Н; кварцевый песок с модулем крупности частиц 1,97; суперпластификатор «Полипласт СП-3» в количестве 0,8 % от массы цемента; полые стеклянные микросферы марки МС-ВП-А9 10 % по отношению к кварцевому песку; полимерные и базальтовые волокна от 0,6 до 2,0 кг/м³ бетонной смеси.

В настоящее время существуют схемы приготовления строительных, в том числе сухих строительных, смесей с использованием механоактивации, а также с применением ультразвука, вибрации, магнитной индукции и других [15–21] методов химической активации [4, 5, 10, 11, 22–24].

В целях изучения основных физико-механических свойств бетона на основе сухой строительной смеси проведены исследования влияния базальтового и полипропиленового дисперсно-армирующего волокна на структуру бетонной матрицы. В ходе теоретических и экспериментальных исследований было определено, что введение данных видов фиброволокон способствует увеличению прочности бетона. Применение фиброволокна способствует возможности получения нерасслаиваемой и реологически однородной смеси на стадии перемешивания. В ходе твердения бетона образуется пространственно-армированная микроструктура, благодаря чему повышается способность бетона сопротивляться про-

цессам трещинообразования как при усадке, так и при эксплуатации.

Технология приготовления сухой цементно-песчаной смеси состава Ц:П = 1:3 с совместным применением суперпластификатора, стеклянных микросфер, полимерных или базальтовых волокон включала обработку в линейном индукционном вращателе (ЛИВ) с индуктивностью переменного поля 0,2 Тл и частотой 50 Гц. В камере ЛИВ смесь перемешивалась и измельчалась. Продолжительность диспергации за счет электромеханических сил, воздействующих на мелющие тела в виде ферромагнитных металлических отрезков, происходила в течение 240 с. Полимерные и базальтовые волокна вводились в сухую смесь отдельно, т.е. в каждой композиции использовался только один из двух представленных типов волокон. Таким образом, в камеру ЛИВ погружали сухие компоненты смеси, фиброволокна и расчетное количество мелющих тел. Сухие смеси, обработанные в электромагнитном поле, смешивали с водой в количестве, необходимом для получения растворов равной подвижности. Время приготовления растворов составляло 4–5 мин, в течение которого увеличивались показатели пластичности и однородности раствора при неизменном количестве воды затворения по сравнению с контрольными составами без применения базальтового или полимерного фиброволокна.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследований для оценки влияния введения фиброволокна на основные эксплуатационные свойства мелкозернистого бетона на базе сухих строительных смесей с помощью электромагнитной обработки подготовлены образцы размером 40 × 40 × 160 мм. Результаты испытаний мелкозернистого бетона, приготовленного из активированных сухих смесей, представлены в табл. 1 и на рис. 1. При обработке полученных лабораторных данных было определено, что мелкозернистый бетон, полученный на основе сухих смесей с использованием полимерного и базальтового фиброволокна, имел повышенные прочностные характеристики.

На первом этапе проводились исследования, направленные на определение оптимальной концентрации суперпластифицирующей добавки «Полипласт СП-3». Для исследования изготовлены образцы со следующим количеством добавки суперпластификатора: 0,25; 0,5; 0,75; 1 % по массе вяжущего. Результаты исследований приведены в табл. 1. В процессе проведенных исследований определена наиболее оптимальная концентрация суперпластификатора СП-3, которая составила 0,5 % по массе цемента.

Введение 0,5 % СП-3 по массе цемента положительно влияет на эксплуатационные свойства фибробетона. Так, при сравнении с контрольными образцами без применения указанной добавки при-

Табл. 1. Влияние добавки СП-3 на свойства бетона

Table 1. The influence of SP-3 additive on the properties of concrete

Номер состава Composition Number	Количество добавки СП-3, % по массе цемента Quantity of additive SP-3, % by weight of cement	Расплыв конуса, мм Cone spread, mm	Прочность, МПа Strength, MPa	
			Изгиб Bend	Сжатие Compression
1	0	108	2,8	44,86
2	0,25	107	4,2	50,02
3	0,5	109	5,9	60,45
4	0,75	108	4,5	61,01
5	1,0	109	5,8	59,14

рост прочности при сжатии составил 47 %, а прочность при растяжении на изгиб увеличилась почти в 2 раза.

При дальнейшем увеличении пластифицирующей добавки наблюдается снижение прочности, а также повышается стоимость фибробетона.

На втором этапе рассматривалось влияние различных концентраций фиброволокна на прочностные характеристики бетона (табл. 2).

При изучении полученных экспериментальных данных установлено, что оптимальным количеством фиброволокна для бетона с применением как базальтовой, так и полипропиленовой фибры является 1,4 кг/м³. При дальнейшем увеличении количества фиброволокна в составе бетона отмечается образо-

вание комков и, как следствие, снижается прочность такого фибробетона. Помимо этого, увеличивается его стоимость.

Из полученных сведений видно, что при использовании базальтового фиброволокна в мелкозернистом бетоне наибольшая прочность при сжатии была у состава 6 с расходом 1,4 кг/м³. Увеличение прочности по сравнению с контрольными образцами составило 28 %, в то время как на изгиб — 45 %. При этом плотность образцов практически не изменялась (увеличение на 3 %). При применении полипропиленового фиброволокна максимальное увеличение прочности наблюдалось при введении добавки 1,2 кг/м³. Максимальное увеличение прочности при сжатии составило 29 %, при изгибе 42 %,

Табл. 2. Влияние применяемых стеклянных микросфер, пластификаторов, фиброволокна и магнитной обработки сухой смеси на свойства мелкозернистого бетона

Table 2. The effect of applied glass microspheres, superplasticizer, fibre fillers and magnetic treatment of dry mix on the properties of fine-grained concretes

Номер Number	Расход фибры, кг/м³ Cosumption of fibre filler, kg/m³	Полипропиленовое фиброволокно Filler based on polymer fibres		Базальтовое фиброволокно Filler based on basalt fibres	
		Прочность мелкозернистого бетона, МПа Strength of fine-grained concrete, MPa		Прочность мелкозернистого бетона, МПа Strength of fine-grained concrete, MPa	
		Изгиб Bending	Сжатие Compression	Изгиб Bending	Сжатие Compression
1	0	7,3	56,81	7,3	56,81
2	0,6	7,5	57,45	7,8	58,20
3	0,8	7,7	61,82	8,5	64,33
4	1,0	8,2	66,45	8,8	68,52
5	1,2	10,4	73,33	9,3	70,57
6	1,4	9,6	68,23	10,6	72,72
7	1,6	9,4	70,52	9,1	68,15
8	1,8	9,7	69,19	9,6	69,43
9	2,0	9,3	69,45	9,8	70,64

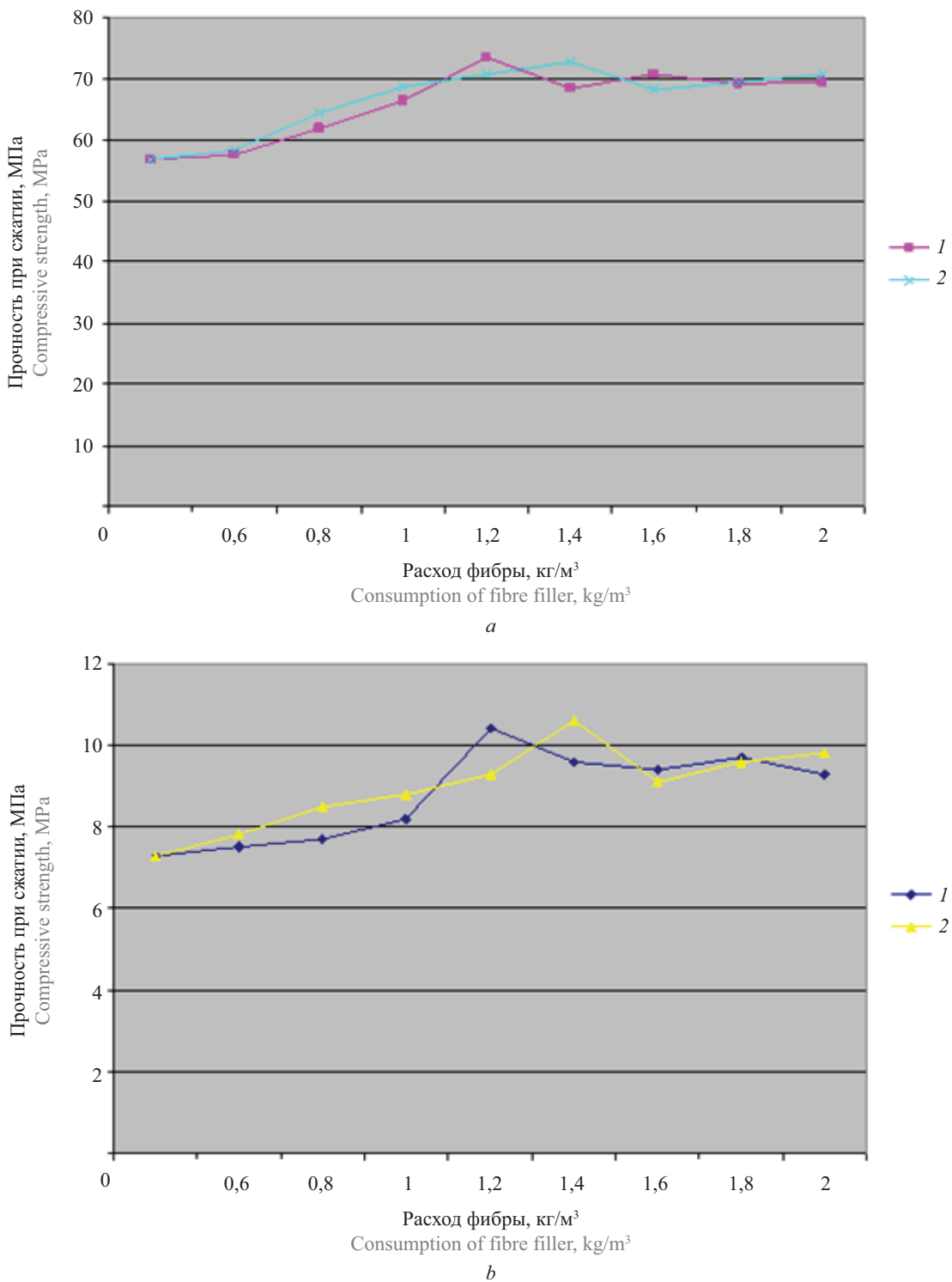
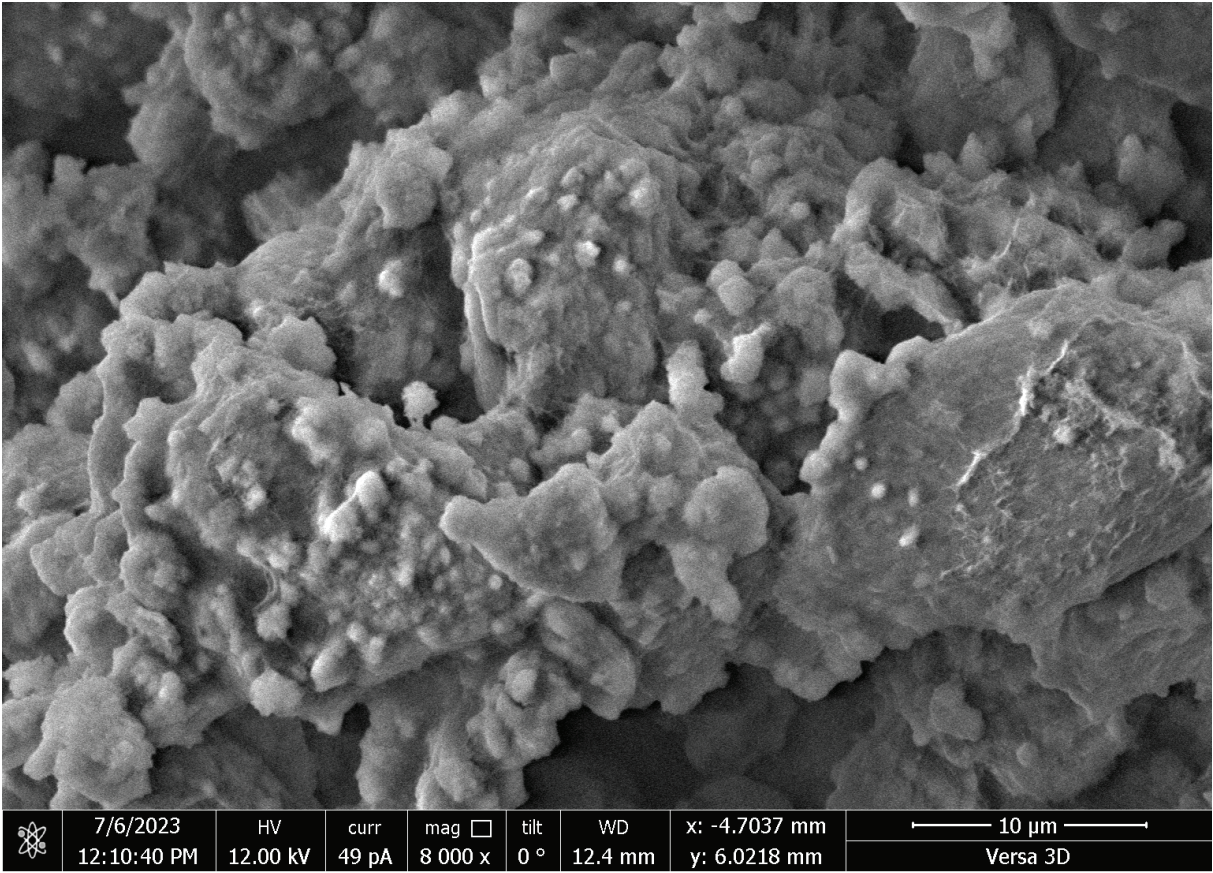


Рис. 1. Влияние расхода фибрового волокна, стеклянных микросфер и суперпластификатора на изменение прочности мелкозернистого бетона: 1 — полипропиленовая фибра; 2 — базальтовая фибра

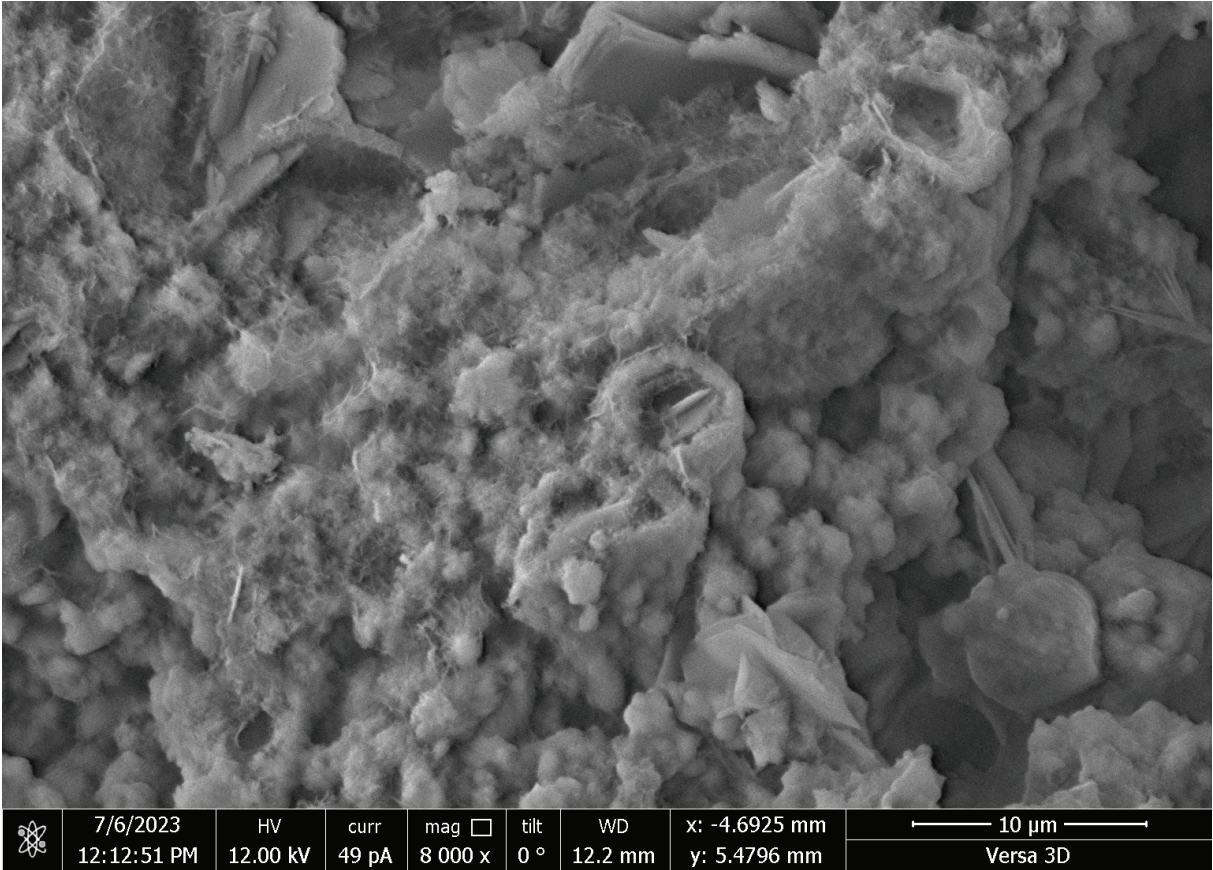
Fig. 1. The effect of the consumption of fibre fillers, glass microspheres and superplasticizer on the change in the strength of fine-grained concrete: 1 — polymer fibre filler; 2 — basalt fibre filler

при этом отмечалось уменьшение плотности на 2 %. При дальнейшем увеличении расхода полимерных и базальтовых волокон прочностные характеристики несколько снижаются (рис. 1), что может быть связано с образованием большего количества агломератов волокон и увеличением неоднородности смеси.

Увеличение прочности полученных образцов можно объяснить тем, что комплексное введение в сухую строительную смесь пластифицирующей добавки, полых стеклянных микросфер и фиброволокна улучшает сцепление при образовании цементно-песчаной матрицы. Это позволяет повы-



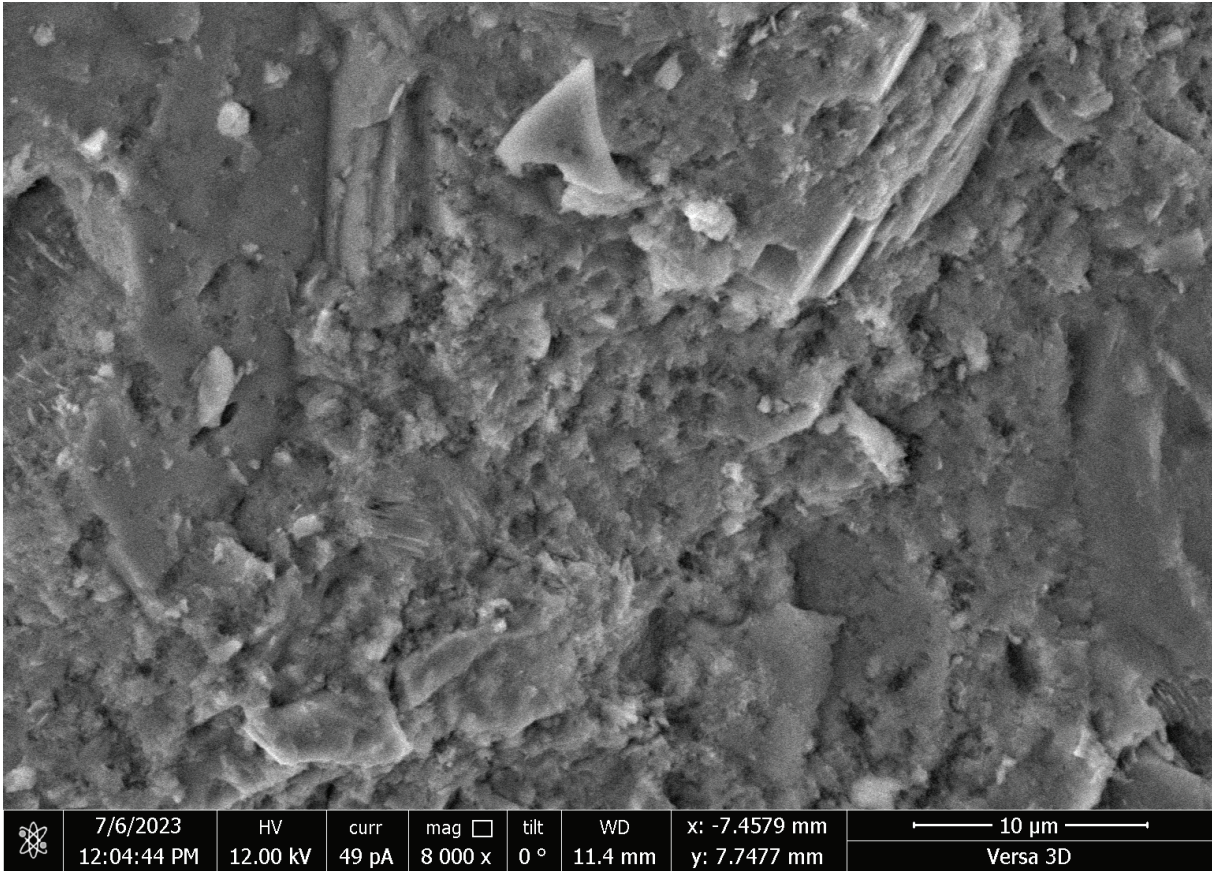
a



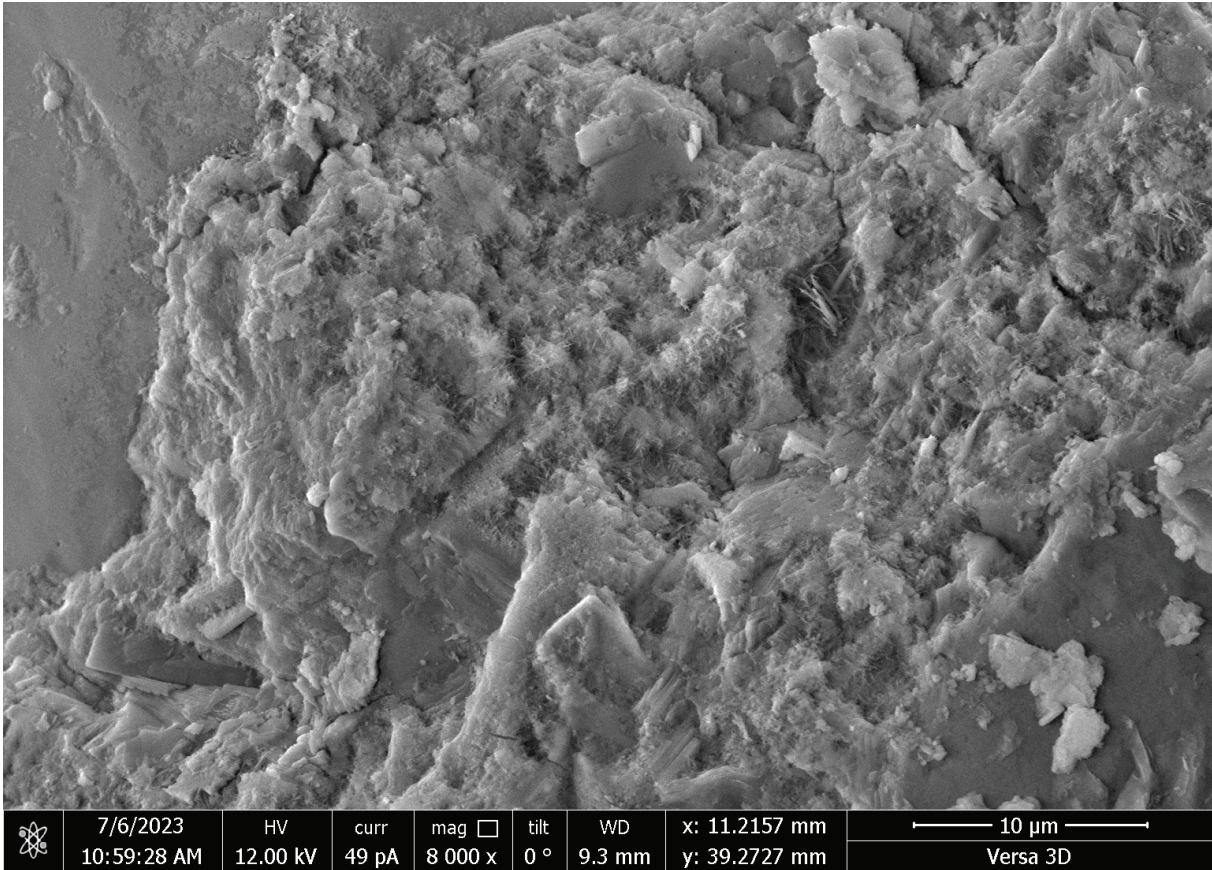
b

Рис. 2. Микрофотография бетона, изготовленного на основе цемента без механоактивации

Fig. 2. Microphotograph of concrete made from cement without mechanical



a



b

Рис. 3. Микрофотография бетона из активированного цемента

Fig. 3. Micrograph of concrete made from activated cement

ситель трещиностойкость и, как следствие, долговечность. Данное увеличение достигается за счет релаксирующего воздействия фиброволокна, что снижает контактное напряжение между образовавшейся цементной матрицей с включением наполнителя. Исходя из этого, время разрушения бетонов с применением фиброволокна существенно увеличивается в сравнении с традиционными мелкозернистыми бетонами. Благодаря указанным свойствам можно значительно снизить трудозатраты, связанные с арматурными работами в железобетонных конструкциях, и увеличить производительность работ. За счет увеличения прочностных показателей, а также трещиностойкости возможно уменьшить сечение конструкций, выполненных из указанных бетонов. Главным недостатком применения фиброволокна служит затруднение при введении и перемешивании добавки, так как фибра склонна к образованию агломератов. Кроме того, требуется дополнительное повышение пластичности смеси, что достигается применением пластификаторов, благодаря которым при сохранении водоцементного отношения можно добиться повышения указанных характеристик с учетом сохранения заданной прочности.

Произведено исследование образцов с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) при кратности увеличения до 40 000. Для исследования отбирались образцы бетонов, прошедшие испытания на прочность. Бетон без применения механоактивации обладает более рыхлой структурой, что свидетельствует о большей пористости материала. Таким образом, бетон, изготовленный на основе механоактивированного вяжущего, имеет более плотную, мелкокристаллическую структуру, что является одной из причин повышения прочности бетона (рис. 2, 3).

На рис. 2, 3 можно наблюдать структуру исследуемых бетонов. Из рис. 2 видна структура контрольного образца бетона из сухой строительной смеси. На рис. 3 показаны образцы с включением различных видов фибр, а также с применением механической активации.

При сравнении механоактивированного цемента с контрольным образцом можно сделать вывод о том, что полученный бетон имеет более плотное и однородное распределение частиц компонентов. Наполнитель охвачен однородным слоем цементного камня. Механическая активация увеличивает удельную поверхность частиц цементно-песчаной смеси, что положительно влияет на компоновку частиц в смеси. Образцы без применения механоактивации имели более рыхлую структуру, следовательно, пористость такого материала больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментальных и теоретических исследований определено положительное влияние введения базальтового и полипропиленового фибро-

волокна, характеризующееся высокими эксплуатационными характеристиками фибробетона. Так, выявлена оптимальная концентрация суперпластификатора «Полипласт СП-3», которая составила 0,5 % от массы цемента. При этой дозировке наблюдается максимальный прирост прочности: прирост прочностей при сжатии составил 47 %, а при изгибе почти в 2 раза. Оптимальное количество фиброволокна для обоих типов (базальтового и полипропиленового) составило 1,4 кг/м³. При этом базальтовое волокно обеспечивает увеличение прочности при сжатии на 28 % и при изгибе на 45 %. Введение полипропиленового волокна увеличило прочность при сжатии на 29 % и при изгибе на 42 %.

Применение СЭМ позволило оценить структурные изменения бетона, полученного при использовании механоактивации. Так, в бетонах на основе активированного вяжущего формируется более плотная и однородная структура, улучшается распределение частиц, благодаря чему снижается пористость материала и повышается его однородность.

Проведенные исследования подтвердили эффективность использования фибровых волокон в составе мелкозернистого бетона. Выявлено положительное влияние механоактивации на структуру и свойства материала. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых строительных материалов на основе комплексного применения механической активации бетонной смеси и введении фиброволокна, что даст возможность получать фибробетон с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Преимущество предварительной электромагнитной обработки составов сухих строительных смесей с использованием суперпластификатора, стеклянных микросфер и фибры по сравнению с составами, приготовленными по традиционной технологии (обычное перемешивание), заключается в увеличении прочности на изгиб в 2,7 раза, а на сжатие — на 76,2 % (см. композицию 6 на базальтовом волокне (табл. 1)) по отношению к составу, который не подвергался электромагнитной обработке. Экспериментально подтверждено, что введение фиброволокна (как полимерного, так и базальтового) в состав мелкозернистого бетона существенно улучшает его физико-механические характеристики.

При дозировке фибры от 0,6 до 1,2 кг/м³ значительно увеличивается прочность на растяжение при изгибе и прочность при сжатии. Электромагнитная механическая активация сухих строительных смесей в камере ЛИВ дополнительно усиливает положительный эффект введения фиброволокна, что подтверждается повышением прочностных характеристик. Таким образом, комбинированное использование механической активации и микроармирующих волокон совместно с применением

стеклянных микросфер является эффективным способом улучшения свойств мелкозернистого бетона.

Экспериментально определено, что для увеличения подвижности фибробетонов рекомендуется комплексное введение совместно с пластифицирующей добавкой. Установлена оптимальная концентрация суперпластификатора «Полипласт СП-3», равная 0,5 % по массе цемента. Дальнейшее увеличение количе-

ства пластификатора снижает прочностные характеристики бетона. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработанной технологии производства мелкозернистого бетона с использованием механоактивации и фиброволокна. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию технологических параметров процесса и расширение ассортимента применяемых материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kanaan D.M., Soliman A.M. Fresh and Mechanical Properties of One-Part Alkali-Activated Self-Consolidating Concrete // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Pp. 17–30. DOI: 10.1007/978-981-19-0507-0_3
2. Tekle B.H., Holschemacher K., Löber P., Heiden B. Mechanical Behavior and Frost-Resistance of Alkali-Activated Cement Concrete with Blended Binder at Ambient Curing Condition // *Buildings*. 2021. Vol. 11. Issue 2. P. 52. DOI: 10.3390/buildings11020052
3. Winnefeld F., Gluth G.J. G., Bernal S.A., Bignozzi M.C., Carabba L., Chithiraputhiran S. et al. RILEM TC 247-DTA round robin test: sulfate resistance, alkali-silica reaction and freeze-thaw resistance of alkali-activated concretes // *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53. P. 140. DOI: 10.1617/s11527-020-01562-0
4. Xie T., Visintin P., Zhao X., Gravina R. Mix design and mechanical properties of geopolymer and alkali activated concrete: Review of the state-of-the-art and the development of a new unified approach // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 256. P. 119380. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119380
5. Coppola L., Coffetti D., Crotti E., Gazzaniga G., Pastore T. The Durability of One-Part Alkali-Activated Slag-Based Mortars in Different Environments // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 9. P. 3561. DOI: 10.3390/su12093561
6. Goma'a E., Simon P.S., Kashosi C., El Gawaydy M. Mechanical Properties of High Early Strength Class C Fly Ash-Based Alkali Activated Concrete // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2020. Vol. 2674. Issue 2. Pp. 430–443. DOI: 10.1177/0361198120915892
7. Alanazi H., Hu J., Kim Y.R. Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 197. Pp. 747–756. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.172
8. Хохряков О.В. Композиционные цементы низкой водопотребности. Возможности и перспективы применения в строительных материалах // *Строительные материалы*. 2022. № 1–2. С. 123–133. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-123-133. EDN KCHDGH.
9. Самченко С.В., Егоров Е.С. Влияние ультрадисперсной добавки из предварительно гидратированного цемента на свойства цементной пасты // *Техника и технология силикатов*. 2019. Т. 26. № 2. С. 52–57. EDN DAQXRC.
10. Erofeev V., Vatin N., Maksimova I., Tarakanov O., Sanyagina Y., Erofeeva I. et al. Powder-activated concrete with a granular surface texture // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18. Issue 4. Pp. 49–61. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-4-49-61
11. Dudar I., Bondar A., Moroz D. Study of the influence of polymer additives on the properties of dried dry building mixtures // *Modern technology materials and design in construction*. 2023. Vol. 33. Issue 2. Pp. 12–18. DOI: 10.31649/2311-1429-2022-2-12-18
12. Perfilov V.A., Gabova V.V. Nano Modified Foam-Fiber-Concrete Mixture // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. Pp. 1036–1041. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1036
13. Perfilov V.A., Gabova V.V. Nanomodified constructional fiber-reinforced concrete // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 129. P. 05021. DOI: 10.1051/mateconf/201712905021
14. Перфилов В.А. Мелкозернистые фибробетоны : монография. Волгоград : ВолГАСУ, 2015. 127 с. EDN VZQUYD.
15. Пименов С.И., Ибрагимов Р.А. Влияние минералогического состава цемента при его активации на физико-технические свойства тяжелого бетона // *Строительные материалы*. 2017. № 8. С. 64–67. EDN ZFTRYJ.
16. Самченко С.В., Абрамов М.А., Османов А.Б. Анализ изменения характеристик активированного цемента с использованием дезинтеграторной технологии // *Строительные материалы*. 2022. № 11. С. 32–36. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36. EDN PFDWBY.
17. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Baskakova E. Increase of aggregative and sedimentation stability of slag suspensions by ultrasound // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 110. P. 01061. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001061
18. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Kayumov R.A., Deberdeev T.R., Leksin V.V., Sprince A. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 6 (82). Pp. 191–198. DOI: 10.18720/MCE.82.17. EDN YZNVED.

19. Cheng S., Ge K., Sun T., Shui Z., Chen X., Lu J.X. Pozzolan activity of mechanochemically and thermally activated coal-series kaolin in cement-based materials // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 299. P. 123972. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123972

20. Kriskova L., Pontikes Y., Zhang F., Cizer Ö., Jones P.T., Balen K.V. et al. Influence of mechanical and chemical activation on the hydraulic properties of gamma dicalcium silicate // *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 55. Pp. 59–68. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.10.004

21. Пустовзар А.П., Перфилов В.А., Ляшенко Д.А. Активированная сухая смесь для приготовления растворов и мелкозернистых бетонов // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 12 (108). С. 317–325. EDN RYIRBT.

22. Калабина Д.А., Яковлев Г.И., Дрохитка Р., Грахов В.П., Первушин Г.Н., Баженов К.А. и др. Реологическая активация фторангидридных композиций эфирами поликарбоксилата // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 38–47. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-38-47. EDN MCDAMX.

23. Luukkonen T., Yliniemi J., Abdollahnejad Z. Alkali-activated dry-mix concretes // *Handbook of Advances in Alkali-Activated Concrete*. 2022. Pp. 67–68. DOI: 10.1016/b978-0-323-85469-6.00008-8 2022

24. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Ставцева А.В., Колодежная Е.В., Дергунов С.А., Сериков С.В. Моделирование структурных преобразований при измельчении композиционного цемента // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 41–46. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-41-46. EDN DSZFNy.

Поступила в редакцию 21 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 августа 2025 г.

Одобрена для публикации 12 августа 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Александрович Перфилов** — доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазовых сооружений, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 40074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 406728, Scopus: 56966537200, ORCID: 0009-0002-6688-0293; vladimirperfilov@mail.ru;

Дмитрий Александрович Ляшенко — аспирант кафедры нефтегазовых сооружений, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 40074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1054316, Scopus: 59523182400, ORCID: 0009-0002-6688-0293; dmitiry.lyashenko@yandex.ru;

Максим Евгеньевич Николаев — кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых сооружений, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 40074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 935434, Scopus: 59523182400, ResearcherID: MIT-0092-2025, ORCID: 0000-0003-2956-4064; mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru.

Вклад авторов:

Перфилов В.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Ляшенко Д.А. — написание исходного текста, итоговые выводы, оформление статьи.

Николаев М.Е. — написание исходного текста, итоговые выводы, оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kanaan D.M., Soliman A.M. Fresh and Mechanical Properties of One-Part Alkali-Activated Self-Consolidating Concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 17-30. DOI: 10.1007/978-981-19-0507-0_3

2. Tekle B.H., Holschemacher K., Löber P., Heiden B. Mechanical Behavior and Frost-Resistance of Alkali-Activated Cement Concrete with Blended Binder at Ambient Curing Condition. *Buildings*. 2021; 11(2):52. DOI: 10.3390/buildings11020052

3. Winnefeld F., Gluth G.J.G., Bernal S.A., Bignoz M.C., Carabba L., Chithiraputhiran S. et al. RILEM TC 247-DTA round robin test: sulfate resistance, alkali-silica reaction and freeze-thaw resistance of alkali-activated concretes. *Materials and Structures*. 2020; 53:140. DOI: 10.1617/s11527-020-01562-0

4. Xie T., Visintin P., Zhao X., Gravina R. Mix design and mechanical properties of geopolymers and alkali activated concrete: Review of the state-of-the-art and the development of a new unified approach. *Construction and Building Materials*. 2020; 256:119380. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119380

5. Coppola L., Coffetti D., Crotti E., Gazzaniga G., Pastore T. The Durability of One-Part Alkali-Activated Slag-Based Mortars in Different Environments. *Sustainability*. 2020; 12(9):3561. DOI: 10.3390/su12093561

6. Gomaa E., Simon P.S., Kashosi C., El Gwady M. Mechanical Properties of High Early Strength Class C Fly Ash-Based Alkali Activated Concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2021; 2754:1-10. DOI: 10.1177/0361198121101111

tation Research Board. 2020; 2674(2):430-443. DOI: 10.1177/0361198120915892

7. Alanazi H., Hu J., Kim Y.R. Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*. 2019; 197:747-756. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.172

8. Khokhryakov O.V. Composite cements of low water demand. Possibilities and prospects of application in building materials. *Construction Materials*. 2022; 1-2:123-133. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-123-133. EDN KCHDGH. (rus.).

9. Samchenko S.V., Egorov E.S. Effect of ultra-dispersed additive from preliminary hydrated cement on the properties of cement paste. *Technique and Technology of Silicates*. 2019; 26(2):52-57. EDN DAQXRC. (rus.).

10. Erofeev V., Vatin N., Maksimova I., Tarakanov O., Sanyagina Y., Erofeeva I. et al. Powder-activated concrete with a granular surface texture. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(4):49-61. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-4-49-61

11. Dudar I., Bondar A., Moroz D. Study of the influence of polymer additives on the properties of dried dry building mixtures. *Modern technology materials and design in construction*. 2023; 33(2):12-18. DOI: 10.31649/2311-1429-2022-2-12-18

12. Perfilov V.A., Gabova V.V. Nano Modified Foam-Fiber-Concrete Mixture. *Solid State Phenomena*. 2018; 284:1036-1041. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1036

13. Perfilov V.A., Gabova V.V. Nanomodified constructional fiber-reinforced concrete. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 129:05021. DOI: 10.1051/mateconf/201712905021

14. Perfilov V.A. *Fine-grained fiber-reinforced concrete : monograph*. Volgograd, VolgGASU, 2015; 126. EDN VZQUYD. (rus.).

15. Pimenov S.I., Ibragimov R.A. Influence of mineralogical composition of cement when activating it on physical-technical properties of heavy concrete. *Construction Materials*. 2017; 8:64-67. EDN ZFTRYJ. (rus.).

16. Samchenko S.V., Abramov M.A., Osmanov A.B. Analysis of changes in the characteristics of activated

cement using disintegrator technology. *Construction Materials*. 2022; 11:32-36. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36. EDN PFDWBY. (rus.).

17. Samchenko S., Kozlova I., Zemskova O., Baskakova E. Increase of aggregative and sedimentation stability of slag suspensions by ultrasound. *E3S Web of Conferences*. 2019; 110:01061. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001061

18. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Kayumov R.A., Deberdeev T.R., Leksin V.V., Sprince A. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 6(82):191-198. DOI: 10.18720/MCE.82.17. EDN YZNVED.

19. Cheng S., Ge K., Sun T., Shui Z., Chen X., Lu J.X. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated coal-series kaolin in cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 2021; 299:123972. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123972

20. Kriskova L., Pontikes Y., Zhang F., Cizer Ö., Jones P.T., Balen K.V. et al. Influence of mechanical and chemical activation on the hydraulic properties of gamma dicalcium silicate. *Cement and Concrete Research*. 2014; 55:59-68. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.10.004

21. Pustovgar A.P., Perfilov V.A., Lyashenko D.A. Activated dry mix for the preparation of mortars and fine-grained concrete. *Engineering journal of Don*. 2023; 12(108):317-325. EDN RYIRBT. (rus.).

22. Kalabina D.A., Yakovlev G.I., Drochitka R., Grakhov V.P., Pervushin G.N., Bazhenov K.A. et al. Rheological activation of fluoroanhydrite compositions with polycarboxylate esters. *Construction Materials*. 2020; 1-2:38-47. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-38-47. EDN MCDAMX. (rus.).

23. Luukkonen T., Yliniemi J., Abdollahnejad Z. Alkali-activated dry-mix concretes. *Handbook of Advances in Alkali-Activated Concrete*. 2022; 67-68. DOI: 10.1016/b978-0-323-85469-6.00008-8 2022

24. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Stavtseva A.V., Kolodezhnaya E.V., Dergunov S.A., Serikov S.V. Modeling of structural transformations when grinding composite cement. *Construction Materials*. 2021; 11:41-46. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-797-11-41-46. EDN DSZFNy. (rus.).

Received March 21, 2025.

Adopted in revised form on August 12, 2025.

Approved for publication on August 12, 2025.

B I O N O T E S: **Vladimir A. Perfilov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Oil and Gas Structures, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 40074, Russian Federation; ID RSCI: 406728, Scopus: 56966537200, ORCID: 0009-0002-6688-0293; vladimirperfilov@mail.ru;

Dmitry A. Lyashenko — postgraduate student of the Department of Oil and Gas Structures, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 40074, Russian Federation; ID RSCI: 1054316, Scopus: 59523182400, ORCID: 0009-0002-6688-0293; dmitry.lyashenko@yandex.ru;

Maksim E. Nikolaev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Structures, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 40074, Russian Federation; ID RSCI: 935434, Scopus: 59523182400, ResearcherID: MIT-0092-2025, ORCID: 0000-0003-2956-4064; mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru.

Contribution of the author:

Vladimir A. Perfilov — scientific supervision, research concept, development of methodology, writing the original text, final conclusions.

Dmitry A. Lyashenko — writing the original text, final conclusions, article design.

Maksim E. Nikolaev — writing the original text, final conclusions, article design.

The authors declare that there is no conflict of interest.