



Механические свойства цементных композитов, армированных керамическим волокном

Г. А. Зимакова✉, Е. А. Каспер, О. С. Бочкарева
Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Российская Федерация

✉ ga.winter@yandex.ru

Аннотация. Особая роль в модификации структуры цементных композитов отводится армирующим компонентам и добавкам химического типа. Использование в качестве дисперсно-армирующего компонента керамических волокон в составе цементных систем позволяет повысить прочность на растяжение при изгибе, трещиностойкость и долговечность материала. По результатам исследования выявлено, что в качестве структурообразующего компонента бетона рационально применять керамические волокна на основе муллитокремнезема диаметром от 0.02 до 0.06 мм в сочетании с химической добавкой на основе карбоксилатов. Установлены оптимальные дозировки муллитокремнеземистого волокна, влияющие на структуру и физико-механические свойства цементного камня. Методом растровой электронной микроскопии и спектрального анализа изучены процессы, происходящие на границе раздела *цементная матрица – волокно*, выявлено, что обрастание волокон фазообразующими гидратами обеспечивается за счет структурно-химического соответствия. Применение керамических волокон высокотемпературного синтеза и водоредуцирующей добавки позволило увеличить прочность на сжатие цементных композитов в 1.9 раза, повысить сопротивление цементного камня разрушению за счет увеличения прочности на растяжение при изгибе в 3.9 раза и повышения трещиностойкости в 2 раза по сравнению с контрольным составом.

Ключевые слова: цементные композиты, суперпластификатор, дисперсное армирование, керамическое волокно, прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе, трещиностойкость

Для цитирования: Зимакова Г. А., Каспер Е. А., Бочкарева О. С. Механические свойства цементных композитов, армированных керамическим волокном. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(4):44–54. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-44-54>

Mechanical properties of cement composites reinforced with ceramic fiber

Galina A. Zimakova✉, Elena A. Kasper, Olga S. Bochkareva
Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

✉ ga.winter@yandex.ru

Abstract. Reinforcing components and chemical additives are significant in modifying the structure of cement composites. Ceramic fibers, as a disperse-reinforcing component in cement systems, provide increased tensile strength in bending, crack resistance and durability of the material. The results of the research have revealed that such a concrete structure-forming component as ceramic mullite-silica fiber 0.02 to 0.06 mm across is rational to combine with a carboxylates-based chemical additive. Optimal dosages of mullite-silica fiber that influence the structure and physical-mechanical properties of the cement stone were determined. The method

of scanning electron microscopy and spectral analysis was used to examine processes on the interface *cement matrix – fiber*. It has been underlined that fibers are covered by phase-forming hydrates due to structural and chemical correspondence. The use of ceramic fibers of high-temperature synthesis and water-reducing additive made it possible to increase the compressive strength of cement composites by 1.9 times compared to the control sample, as well as to improve the resistance of cement stone to destruction by increasing the bending tensile strength by 3.9 times and crack resistance by 2 times compared to the control composition.

Keywords: cement composites, superplasticizer, dispersed reinforcement, ceramic fiber, compressive strength, bending tensile strength, crack resistance

For citation: Zimakova G. A., Kasper E. A., Bochkareva O. S. Mechanical properties of cement composites reinforced with ceramic fiber. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(4):44–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-44-54>



1. Введение

Надежность железобетонных конструкций связана с сопротивлением бетона к образованию и раскрытию трещин. К основным факторам, обуславливающим трещиностойкость, относят: структурные, прочностные и деформативные характеристики бетона; физико-механические свойства арматуры и ее распределение по сечению конструкции; коррозионную стойкость к воздействию окружающей среды. Управление процессами структурообразования с целью получения композита с заданным набором технических характеристик реализуется за счет изменения компонентного состава цементных бетонов. Повышению прочности бетона посвящено большое число научных исследований, в которых значительная роль отводится химическим и минеральным добавкам [1–4]. Изучены закономерности влияния модификаторов химического типа и изложены механизмы электростатического взаимодействия, выявлена эффективность применения активных минеральных добавок [5, 6]. Вопросы управления трещиностойкостью бетона решаются путем многоуровневого армирования, при этом дисперсное упрочнение бетона рассматривается как эффективный прием торможения трещин на микроуровне. Возможный диапазон повышения технических характеристик цементных композитов и достигаемые эффекты от введения новых структурообразующих компонентов в виде волокон микро- и наноразмерного диапазона изложены в работах [7–11]. Применение конструкций из таких композитов позволило реализовать строительство ряда уникальных объектов за счет расширения технологических решений и улучшения технических показателей качества бетонов [12–15].

Применение армирующих компонентов в составе бетона основано на концепции о перераспределении нагрузок от цементной матрицы волокнам за счет сил, действующих на поверхности раздела *цементная матрица – волокно*. Повышенное сопротивление разрушению в этом случае достигается за счет блокирования микротрещинообразования и препятствования развитию магистральных трещин. Эффект от введения волокон зависит от таких факторов, как соотношение модулей упругости фибры и матрицы, коэффициент фибрового армирования, ориентация волокон и их химическая стойкость по отношению к матрице. Конструкции из фибробетона обладают высокой динамической прочностью за счет перераспределения энергии ударных воздействий.

По сравнению с другими видами волокон металлическая фибра имеет ряд преимуществ [16–18], однако ее производство является достаточно трудоемким. Некоторые виды металлических фибр не обладают достаточной анкерующей способностью. В исследованиях [9, 10, 12, 19–21] отражено изменение прочностных показателей и приведен обзор аспектов долговечности бетона вследствие дисперсного армирования полипропиленовыми, полиэтиленовыми, стеклянными, базальтовыми, углеродными и другими видами волокон. Установлено, что дисперсное армирование стеклянными волокнами позволяет повысить прочность бетона на растяжение, трещиностойкость, стойкость к ударным нагрузкам [9, 20]. Проведено множество испытаний прочности, долговечности, температуры и микроструктур-

Таблица 1. Основные характеристики неорганических армирующих волокон и нитей
Table 1. Main properties of inorganic reinforcing fibers and filaments

Волокно	Диаметр, мкм	Плотность, г/см ³	Температурный диапазон, °С	Модуль упругости, ГПа	Прочность, ГПа
Стеклоанное, тип Е и S	3–30	2.6–2.8	900–1000	70–90	2.0–5.0
Базальтовое	10–18	2.7–2.9	100–1200	70–90	1.8–1.9
Кварцевое	3–10	2.2–2.25	1600–1700	70–75	3–6
Волокно оксида алюминия	15–25	2.9–3.9	2000–2100	350–380	1.4–2.4
Волокно карбида кремния	100–150	3.1–3.2	2700–2800	400–480	1–3.5

ных характеристик бетона, армированного базальтовой фиброй [11, 21], полученные результаты свидетельствуют о повышении целого ряда технических характеристик бетона при дозировании фибры в определенном диапазоне. В процессе исследований применяют в основном базальтовые волокна со следующими техническими характеристиками: прочностью на разрыв 1.6–3.6 ГПа, модулем упругости до 80–110 ГПа, диаметром фибры 8–10 мкм, длиной 100–500 мкм, для улучшения свойств волокон применяют модифицирование, например, астраленами [11]. Стойкость стеклянной и базальтовой фибры к щелочам имеет решающее значение, однако результаты исследований щелочестойкости противоречивы. Так, обнаружено [10], что в щелочных условиях по мере увеличения продолжительности твердения на поверхности как базальтовой, так и стеклянной фибры формируются новые гидраты, которые являются результатом реакции между раствором щелочи и активным кремнеземом волокон, что приводит к уменьшению объема волокон. Поэтому в мировой практике применяют щелочестойкие стеклянные волокна, а изменение характеристик базальтовых волокон на данном этапе исследований считается допустимым. В таблице 1 представлены основные характеристики армирующих волокон и нитей.

Как следует из результатов анализа имеющихся научных данных, наиболее универсальны для микродисперсного армирования бетонов неорганические волокна, которые отвечают требованиям по прочности, достаточной щелочной, кислотной и коррозионной стойкости, обеспечивают повышение предела огнестойкости конструкций. В процессе проведенного исследования в качестве фибры для дисперсного армирования бетона использованы керамические волокна муллитокремнеземистого состава. Армирование керамическими волокнами, как правило, применяется в конструкционной керамике для повышения устойчивости композитной конструкции к распространению трещин и устранения резкого хрупкого разрушения высокотемпературной матрицы (УНТСС).

Целью данной работы явилось исследование влияния муллитокремнеземистого волокна на свойства модифицированного добавками цементного камня и бетона.

2. Материалы и методы

В проведенных исследованиях были использованы следующие материалы:

- портландцемент Сухооложского цементного завода ЦЕМ I 42.5Н по ГОСТ 31108-2020¹;
- добавка суперпластификатор SikaViscoCrete 20NE на основе водных композиций модифицированных поликарбоксилатных эфиров;
- волокно керамическое муллитокремнеземистое РУВОЛ-М производства ООО «Морган Термал Керамикс Сухой Лог» (Российская Федерация) (рис. 1).

¹ ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия = Common cements. Specifications. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200174658> (дата обращения: 14.08.2024).

Химический состав волокон, %: Al_2O_3 – 52.37; SiO_2 – 40.44; P_2O_5 – 2.94; K_2O – 1.95; CaO – 1.03; Fe_2O_3 – 0.726; Cr_2O_3 – 0.0277. Диаметр волокон 1.5–4 мкм, длина волокон от 0.3 до 1.6 мм;

- кварцевый песок с модулем крупности 2.16, отвечающий требованиям стандарта;
- вода в соответствии с ГОСТ 23732-2011².

Реологические характеристики цементного теста оценивались по величине расплыва конуса на встряхивающем столике. Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы-кубы с ребром 2 см и образцы-призмы размером 2 × 2 × 6 см. Образцы твердели в воде при температуре 20 °С. Прочность на сжатие определялась в возрасте 2, 7 и 28 суток, прочность на растяжение при изгибе – в возрасте 28 суток. Для оценки трещиностойкости применялись: величина напряжения, при котором образуется трещина, коэффициент трещиностойкости (Ктр) – определялся расчетным методом по соотношению величины предела прочности на растяжение при изгибе к прочности на сжатие. Эффективность применения волокон изучена по результатам испытания образцов размером 400 × 100 × 40 мм из мелкозернистого бетона в возрасте 28 суток.

Методом растровой сканирующей микроскопии с применением электронного оптического микроскопа инвертированного типа GX-51 изучены фрактальные поверхности раздела *цементная матрица – волокно* и представлены СЭМ-изображения кристаллизующихся новообразований на поверхности волокон, выявлен характер трещин на участке разрыва камня под действием изгибающей нагрузки.

3. Результаты и обсуждение

С целью понижения пористости цементного камня и повышения прочности при условно-постоянных реологических характеристиках теста изучено влияние добавки SikaViscoCrete 20HE в интервале дозировок 0.5–1.5 мас. %. Полученные результаты представлены в таблице 2 и на рис. 2.

Таблица 2. Реологические характеристики цементного теста и механические свойства цементного камня, модифицированного добавкой SikaViscoCrete 20HE
Table 2. Rheological properties of cement paste and mechanical properties of cement stone modified with SikaViscoCrete 20HE

№ серии	Дозировка добавки, мас. %	Диаметр расплыва, мм	В/Ц	Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте, сут.			Прочность на растяжение при изгибе, МПа
				2	7	28	
1	–	156	0.31	32.0	35.5	44.5	5.45
2	0.5	155	0.23	49.0	51.6	81.2	10.73
3	1	158	0.19	55.2	60.4	103.5	16.87
4	1.5	158	0.18	44.8	50.9	83.3	18.68

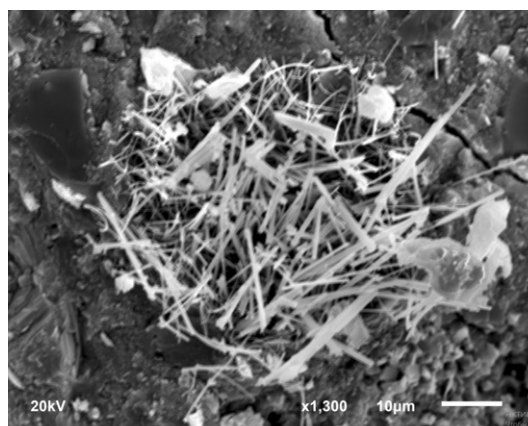


Рис. 1. Вид муллитокремнеземистых волокон (фото авторов)

Fig. 1. Mullite-silica fibers (author's photo)

² ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия = Water for concrete and mortars. Specifications. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200093835> (дата обращения: 14.08.2024).

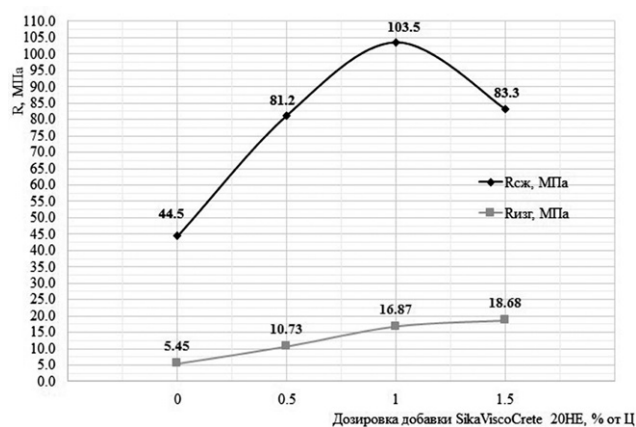


Рис. 2. Влияние дозировки добавки SikaViscoCrete 20HE на прочность цементного камня при сжатии и на растяжение при изгибе (график составлен авторами)

Fig. 2. Effect of SikaViscoCrete 20HE dosage on the compressive and flexural tensile strength of cement stone (authors' diagram)

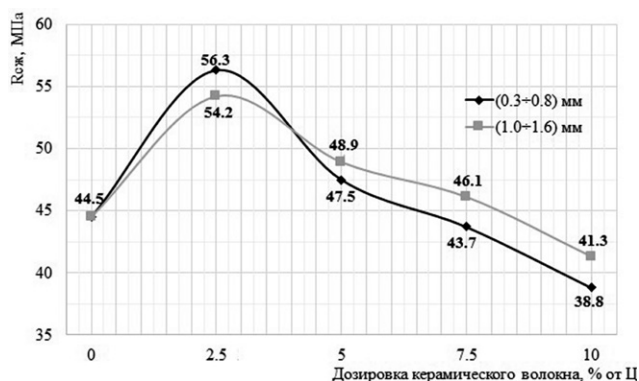


Рис. 3. Влияние длины и дозировки керамического волокна на прочность при сжатии цементного камня (график составлен авторами)

Fig. 3. Effect of ceramic fiber length and dosage on compressive strength of cement stone (authors' diagram)

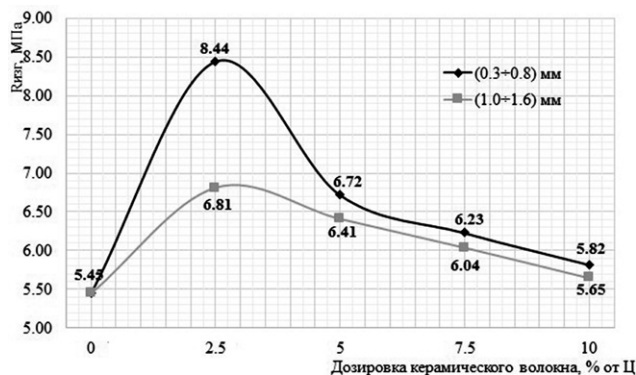


Рис. 4. Влияние длины и дозировки керамического волокна на прочность на растяжение при изгибе цементного камня (график составлен авторами)

Fig. 4. Effect of ceramic fiber length and dosage on flexural tensile strength of cement stone (authors' diagram)

По результатам экспериментальных данных за счет снижения водоцементного фактора до 0.19 при дозировке водоредуцирующей добавки 1.0 мас. % обеспечено значительное повышение прочности цементного камня как при сжатии, так и на растяжение при изгибе.

На следующем этапе исследований изучено влияние длины и дозировки керамического волокна на реологические и механические свойства цементного камня с исходным для контрольного состава В/Ц = 0.31. В качестве параметров варьирования были приняты длина керамического волокна (0.3÷0.8) мм и (1.0÷1.6) мм и его процентное содержание (2.5; 5.0; 7.5 и 10.0 %) от расхода цемента. По результатам испытаний выявлено, что муллитокремнеземистые волокна имеют низкую смачиваемость и при дозировках до 2.5 % значительного влияния на реологию цементного теста не оказывают. Полученные результаты представлены в виде графических зависимостей на рис. 3 и 4.

Анализ результатов показал, что дозировка керамического волокна в количестве 2.5 % от расхода цемента при длине (0.3÷0.8) мм является оптимальной и обеспечивает повышение прочностных характеристик на 26.5 % при сжатии, на 55 % на растяжение при изгибе по сравнению с прочностью контрольного бездобавочного состава. Физические качества цементного камня могли бы быть значительно улучшены, но при дозировках фибры сверх 2.5 % ухудшилась пластичность теста, что при заданной технологии уплотнения является причиной повышения пористости камня, соответственно, отмечается снижение прочностных характеристик. При дозировках керамического волокна свыше 5 % создается сетчатая структура, которая повышает внутреннюю силу связывания матрицы и приводит к снижению текучести цементного теста, происходит локальное комкование, к такому же эффекту приводит и применение волокон увеличенной длины.

На следующем этапе научных исследований были изучены составы с применением добавки ViscoCrete 20HE в выявленной опытным путем оптимальной дозировке 1 % от расхода

Таблица 3. Физико-механические свойства цементного камня, изготовленного с применением муллитокремнеземистого волокна и добавки
Table 3. Physical and mechanical properties of cement stone with mullite-silica fiber and chemical additive

№ состава	Длина волокна, мм	Дозировка волокна, % от Ц	Дозировка добавки, %	Расплав форм-конуса, мм	В/Ц	Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте, сут.			Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	Коэффициент трещиностойкости
						2	7	28		
1	–	–	–	156	0.31	32.0	35.5	44.5	5.45	0.123
2	0.3÷0.8	2.5	–	152	0.32	44.4	53.5	56.3	8.44	0.150
3	–	–	1	158	0.19	55.2	60.4	103.5	16.87	0.163
4	0.3÷0.8	2.5	1	158	0.22	68.3	74.1	84.6	21.31	0.252

цемента и муллитокремнеземистого волокна длиной (0.3÷0.8) мм в количестве 2.5 % от расхода цемента. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 3.

Комплексное действие добавки ViscoCrete 20HE и муллитокремнеземистого волокна способствовало повышению прочности на сжатие. Прочность образцов на растяжение при изгибе при совместном введении добавки ViscoCrete 20HE и муллитокремнеземистого волокна увеличилась на 26 % по сравнению с составом, модифицированным этой же гиперпластифицирующей добавкой.

На рис. 5 представлены фрактальные поверхности границы *цементная матрица – волокно*. Разрушение дисперсно-армированного цементного камня при произвольном объемном распределении волокон происходит в период обрыва фибры без их выдергивания из тела бетона. Так как пластическая деформация матрицы в параллельном приложенному напряжению направлении противодействует релаксации напряжений в разорванном волокне, за счет напряжения сдвига возникают силы, удерживающие разорванное волокно от смещения в матрице.

В цементных системах в начальный период гидратации процессы происходят в жидкой фазе, при недостаточных пересыщениях по фазообразующему веществу рост агрегатов замедляется вследствие наличия гидрозазора между частицами, образующимся зародышам кристаллизации не удается войти в молекулярный контакт. На поверхности волокон адсорбированной воды практически нет. Выступы, кривизна поверхности муллитового волокна, а также структурно-химическое соответствие и сродство химического состава приводят к образованию эпитаксиальных слоев и увеличению вероятности их закрепления на поверхности. Между субмикрочастицами, сближенными до минимальных расстояний, поверхность муллита и локальные дефекты на поверхности волокон, вероятно, являются активными зонами, связывающими кристаллы с их последующим срастанием.

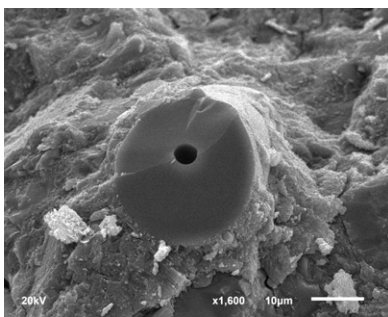
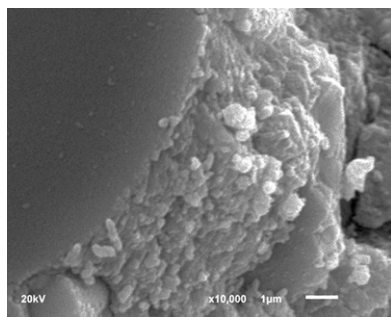


Рис. 5. Процессы роста эпитаксиальных гетероструктур кристаллогидратов на поверхности волокон (фото авторов)
Fig. 5. Growth processes of epitaxial crystal hydrate heterostructures on fiber surfaces (author's photo)

Особенностью распределения новых гидратных фаз является то, что по мере удаления от поверхности волокна размер сростков кристаллогидратов увеличивается от 0.2 до 40 мкм. Небольшое уменьшение пористости, задержка появления внутренних микротрещин и более компактная структура – все это возможные эффекты влияния муллитокремнеземистого волокна.

В процессе исследований выявлен проблемный момент, обнаружено, что с увеличением поперечного размера волокон до 150 мкм и при обратном радиусе кривизны поверхности образование контактов на границе раздела *матрица – волокно* достаточно слабое, зона действительного контакта волокон с матрицей меньше геометрической площади поверхности волокон, образование кристаллогидратов имеет дискретный характер. Поэтому не обеспечивается прерывание трещин, развившихся в цементной матрице и проходящих по контактному слою (рис. 6).

Продуктов щелочной гидратации характерной морфологии, которые могут формироваться на поверхности волокон, в цементном камне при $pH \sim 12.8-13.2$ не выявлено, в то время как на поверхности базальтовых и стеклянных волокон диагностируются продукты щелочной реакции (рис. 7).

Для подтверждения значительного увеличения прочности на растяжение образцов бетона за счет дисперсного армирования выполнены испытания образцов из мелкозернистого бетона. Состав бетонной смеси включал цемент, кварцевый песок, добавку SikaViscoCrete 20HE, муллитокремнеземистую фибру и тонкодисперсный доменный шлак (в дозировке 18 % от массы цемента). Испытание образцов произведено по схеме с одной сосредоточенной нагрузкой.

На рис. 8 показаны структуры трещин образцов бетона, изготовленного с применением смеси бездобавочного состава, 2 и 3 смесь содержали армирующие волокна, в состав 3 смеси включена добавка. Добавление волокон в бетонную смесь позволило уменьшить усадку бетона. Изучение работы изгибаемых бетонных образцов, армированных муллитокремнеземистыми микроволокнами, показало, что введение волокон позволяет увеличить нагрузку трещинообразования на 21 %, уменьшить ширину раскрытия нормальных трещин.

Раскрытие трещин, соответствующее максимальному растягивающему напряжению, заметно снижено (рис. 9). Потенциал трещиностойкости более высокого поведения при возникновении трещин оценивается как отношение напряжения, приводящего к разрыву, к напряжению в период формирования первой трещины. Соотношения предела прочности и прочности при первом трещинообразовании показали, что трещиностойкость бетона возрастает практически в 3 раза. Изменение показателей трещиностойкости при переходе от цементного камня к мелкозернистому бетону связано с влиянием заполнителя.

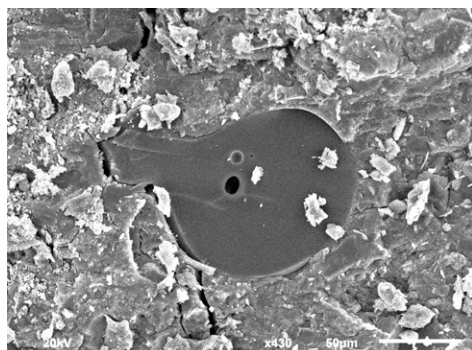


Рис. 6. Поверхность излома цементного камня по результатам испытания на растяжение при изгибе (фото авторов)
Fig. 6. Fracture surface of cement stone from flexural tensile testing (author's photo)

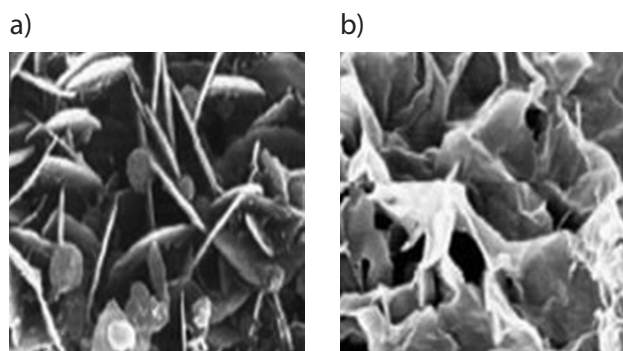


Рис. 7. Продукт щелочной реакции: а) на поверхности базальтовой фибры; б) на поверхности стеклянной фибры, по данным [10]
Fig. 7. Alkali reaction product: a) on the basalt fiber surface; b) on the glass fiber surface, according to the data [10]



Рис. 8. Схема испытания образцов и регистрируемые параметры при испытании (составлена авторами)
 Fig. 8. Samples testing scheme and recorded parameters (authors' diagram)

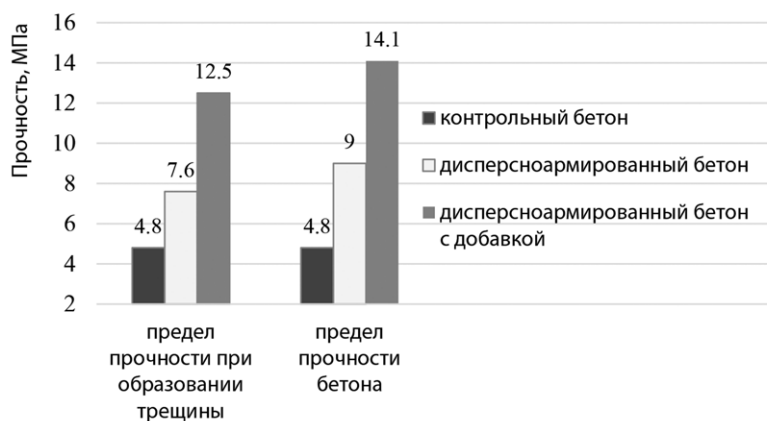


Рис. 9. Показатели прочности бетонных образцов в момент образования первой трещины и при полном разрушении образца (график составлен авторами)
 Fig. 9. Strength indicators of concrete samples at first crack and at complete failure (authors' diagram)

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что свойства дисперсно-армированных керамическими волокнами цементных композитов обусловлены структурно-химическими и механическими характеристиками волокон, состоянием контактов на границе раздела матрица – волокно. Функциональная роль керамических волокон заключается в увеличении напряжения для продвижения микротрещин по матрице, росте затрат энергии на распространение трещин, в перекрытии этих трещин без разрушения и их затухании. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что муллитокремнеземистое волокно в составе цементных композитов является эффективным дисперсно-армирующим компонентом.

4. Заключение

1. Экспериментально выявлены зависимости в системе *рецептурные факторы – параметры структуры – трещиностойкость* при армировании цементных композитов керамическими волокнами. Рекомендованы малоусадочные и долговечные цементные композиты при следующих условиях: обязательное применение в составе смеси высокоэффективной водоредуцирующей добавки; керамических волокон муллитокремнеземистого состава диаметром до 4 мкм, длиной до 1 мм в количестве 2.5 мас. %.
2. Выявлена функциональная роль керамических волокон и продемонстрированы процессы роста эпитаксиальных гетероструктур на поверхности волокон.
3. Установлено, что применение керамических муллитокремнеземистых волокон обеспечивает повышение прочности на сжатие цементного камня, прочности на растяжение при изгибе, трещиностойкости – в 2 раза по сравнению с контрольным составом.

4. Соотношения предела прочности и прочности при первом трещинообразовании мелкозернистого бетона показали, что трещиностойкость бетона возрастает практически в 3 раза.



Вклад авторов. Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Author contributions. All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Демьяненко О. В., Куликова А. А., Копаница Н. О., Петров А. Г. Влияние комплексных модифицирующих добавок на эксплуатационные свойства тяжелого бетона. *Известия высших учебных заведений. Строительство.* 2021;(5):23–32. Режим доступа: <http://www.izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/39c72d50004de06966c6fd461b11881f5fb73167.pdf>.
2. Ильина Л. В., Молодин В. В., Гичко Н. О., Туляганов А. К. Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия. *Строительные материалы.* 2023;(7):36–42. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_54325920_90334451.pdf.
3. Куликова А. А., Копаница Н. О., Дмитриева М. А., Демьяненко О. В., Петров А. Г. Влияние бинарных модифицирующих добавок на процессы гидратации цементных систем. *Строительные материалы.* 2023;(9):83–88. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54718506>.
4. Крамар Л. Я., Кудяков А. И., Трофимов Б. Я., Шулдяков К. В. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* 2017;(4):147–157. Режим доступа: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/334/335>.
5. Кудяков А. И., Симакова А. С., Кондратенко В. А., Шешенко А. Б., Латыпов А. Д. Влияние органических добавок на свойства цементного теста и камня. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* 2018;(6):138–147. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-6-138-147>
6. Zimakova G., Kasper E., Bochkareva O. Strengthening of concrete composites using polycarboxylate and aluminosilicate materials. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2020;1116:316–328. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_31
7. Ткач Е. В., Темирканов Р. И., Ткач С. А. Комплексное исследование модифицированного бетона на основе активированного микрокремнезема совместно с микроармирующим волокном для повышения эксплуатационных характеристик. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2021;332(5):215–226. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/5/3204>
8. Смирнова О. М., Харитонов А. М. Деформационно-упрочняющиеся фиброкомпозиты гидратационного твердения: определение, принципы получения и перспективы применения. *Известия высших учебных заведений. Строительство.* 2022;10(766):14–22. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-766-10-14-22>
9. Рабинович Ф. Н. *Композиты на основе дисперсно армированных бетонов: вопросы теории и проектирования, технология, конструкции.* Москва: Ассоциация строительных вузов; 2011. 639 с.
10. Al-Kharabsheh B. N., Arbili M. M., Majdi A., Alogla S. M., Hakamy A., Ahmad J., Deifalla A. F. Basalt fiber reinforced concrete: a compressive review on durability aspects. *Materials (Basel).* 2023;16(1):429. <https://doi:10.3390/ma16010429>
11. Белова Т. К., Гурьева В. А., Турчанинов В. И. Исследование влияния дисперсного армирования модифицированным базальтовым микроволокном на прочностные свойства цементного раствора. *Инженерный вестник Дона.* 2015;(2-1):35. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24068208>.
12. Серова, Р. Ф., Рахимова Г. М., Стасилович Е. А., Айдарбекова С. Ж. Исследование физико-механических свойств дисперсно-армированных бетонов. *Эпоха науки.* 2018;(14):192–200. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=usqweo>.
13. Yang J., Chen B., Nuti C. Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials.* 2021;302:124104. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124104>
14. Агамов Р. Э., Гончарова М. А., Пачин А. Р. Высокопрочные фибробетоны в конструкциях общестроительного и специального назначения. *Строительные материалы.* 2023;(1-2):39–43. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>
15. Мальцева Т. В., Набоков А. В., Черных А. В. Применение песчаных армированных свай при строительстве малоэтажных зданий. *Вестник Тюменского государственного архитектурно-строительного университета.* 2015;(2):34–39. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24389410>.

16. Yang J., Chen B., Wu X., Xu G. Quantitative analysis of steel fibers on UHPFRC uniaxial tensile behavior using X-CT and UTT. *Construction and Building Materials*. 2023;368(5):130349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130349>
17. Zhang H., Ji T., Lin X. Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2019;211:688–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274>
18. Соловьев В. Г., Матюшин Е. В., Ефишов Л. И. Влияние вида и объемного содержания стальной фибры на прочность сверхвысокопрочного сталефибробетона при сжатии. *Строительные материалы*. 2023;(11):20–27. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-20-27>
19. Sharma R., Jang J. G., Bansal P. P. A comprehensive review on effects of mineral admixtures and fibers on engineering properties of ultra-high-performance concrete. *Journal of Building Engineering*. 2022;45:103314. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103314>
20. Ahmad J., Gonzalez-Lezcano R. A., Majdi A., Ben Kahla N., Deifalla A. F., El-Shorbagy M. A. Glass fibers reinforced concrete: Overview on mechanical, durability and microstructure analysis. *Materials*. 2022;15:5111. <https://doi.org/10.3390/ma15155111>
21. Zheng Y., Zhang Yu, Zhuo J., Zhang Ya., Wan C. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2022;359:129360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129360>

References

1. Demyanenko O. V., Kulikova A. A., Kopanitsa N. O., Petrov A. G. The effect of complex modifying additives on the performance properties of heavy concrete. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021;(5):23–32. (In Russ.) Available at: <http://www.izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/39c72d50004de06966c6fd461b11881f5fb73167.pdf>.
2. Il'ina L.V., Molodin V.V., Gichko N.O., Tulyaganov A. K. Improving the strength characteristics of cement conglomerates with directional additives. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023;(7):36–42. (In Russ.) Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_54325920_90334451.pdf.
3. Kulikova A. A., Kopanitsa N. O., Dmitrieva M. A., Demyanenko O. V., Petrov A. G. Influence of binary modifying additives on the processes of hydration of cement systems. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023;(9):83–88. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54718506>.
4. Kramar L.Ya., Kudyakov A.I., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. Cement Heavy Concretes for Highway Construction. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017;(4):147–157. (In Russ.) Available at: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/334/335>.
5. Kudyakov A. I., Simakova A. S., Kondratenko V. A., Steshenko A. B., Latypov A. D. Cement paste and brick properties modified by organic additives. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2018;20(6):138–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-6-138-147>
6. Zimakova G., Kasper E., Bochkareva O. Strengthening of concrete composites using polycarboxylate and aluminosilicate materials. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;(1116):316–328. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_31
7. Tkach E. V., Temirkanov R. I., Tkach S. A. Comprehensive study of modified concrete based on activated microsilica together with micro-reinforcing fiber to improve performance. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(5):215–226. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/5/3204>
8. Smirnova O. M., Kharitonov A. M. Deformation-hardening fiber composites: definition, principles of preparation and prospects of application. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022;10(766):14–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-766-10-14-22>
9. Rabinovich F. N. *Composites based on dispersed reinforced concrete: issues of theory and design, technology, construction*. Moscow: Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov; 2011. (In Russ.)
10. Al-Kharabsheh B. N., Arbili M. M., Majdi A., Alogla S. M., Hakamy A., Ahmad J., Deifalla A. F. Basalt fiber reinforced concrete: a compressive review on durability aspects. *Materials (Basel)*. 2023;16(1):429. <https://doi.org/10.3390/ma16010429>
11. Belova T. K., Gur'eva V. A., Turchaninov V. I. Investigation of the effect of particulate reinforcement modified basalt microfiber on the strength properties of cement mortar. *Engineering journal of Don*. 2015;(2-1):35. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24068208>.
12. Serova R. F., Rakhimova G. M., Stasilovich E. A., Ajdarbekova S. Zh. Research of physicomechanical properties of dispersed-reinforced concrete. *Era of Science*. 2018;(14):192–200. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=usqweo>.

13. Yang J., Chen B., Nuti C. Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;302:124104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124104>
14. Agamov R. E., Goncharova M. A., Pachin A. R. High-strength fiber-reinforced concrete in structures for general construction and special purposes. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023;(1-2):39–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>
15. Maltseva T. V., Nabokov A. V., Chernykh A. V. Reinforced sand piles for low-rise buildings. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015;(2):34–39. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24389410>.
16. Yang J., Chen B., Wu X., Xu G. Quantitative analysis of steel fibers on UHPFRC uniaxial tensile behavior using X-CT and UTT. *Construction and Building Materials*. 2023;368(5):130349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130349>
17. Zhang H., Ji T., Lin X. Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2019;211:688–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274>
18. Soloviev V. G., Matiushin E. V., Efishov L. I. Influence of type and volume content of steel fiber on the compressive strength of ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023;(11):20–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-20-27>
19. Sharma R., Jang J. G., Bansal P. P. A comprehensive review on effects of mineral admixtures and fibers on engineering properties of ultra-high-performance concrete. *Journal of Building Engineering*. 2022;45:103314. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103314>
20. Ahmad J., Gonzalez-Lezcano R. A., Majdi A., Ben Kahla N., Deifalla A. F., El-Shorbagy M. A. Glass fibers reinforced concrete: Overview on mechanical, durability and microstructure analysis. *Materials*. 2022;15:5111. <https://doi.org/10.3390/ma15155111>
21. Zheng Y., Zhang Yu, Zhuo J., Zhang Ya., Wan C. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2022;359:129360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129360>



Информация об авторах

Зимакова Галина Александровна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, ga.winter@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6437-1941>

Каспер Елена Александровна, старший преподаватель кафедры строительных материалов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, elena-kasper@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9260-6189>

Бочкарева Ольга Станиславовна, старший преподаватель кафедры строительных материалов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, olga_bos09@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4549-1424>

Information about the authors

Galina A. Zimakova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Building Materials, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, ga.winter@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6437-1941>

Elena A. Kasper, Senior Lecturer in the Department of Building Materials, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, elena-kasper@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9260-6189>

Olga S. Bochkareva, Senior Lecturer in the Department of Building Materials, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, olga_bos09@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4549-1424>

Получена 17 октября 2024 г., одобрена 18 ноября 2024 г., принята к публикации 03 декабря 2024 г.
Received 17 October 2024, Approved 18 November 2024, Accepted for publication 03 December 2024