

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**  
**BUILDING AND ARCHITECTURE**

УДК 691.32

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-165-176 Оригинальная статья / Original Paper

**Свойства огнезащитного вермикулитобетонного композита и мелкозернистого бетона для двухслойных армоцементных конструкций**

**Т.А. Хежев<sup>1</sup>, Г.Н. Хаджишалапов<sup>2</sup>, Ф.М. Шогенова<sup>1</sup>, А.Х. Артабаев<sup>1</sup>, М.Х. Машукова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет,  
<sup>1</sup>360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,

<sup>2</sup> Дагестанский государственный технический университет,  
<sup>2</sup>367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка составов огнезащитных вермикулитобетонных композитов для армоцементных конструкций, а также исследование свойств огнезащитного вермикулитобетонного композита и мелкозернистого бетона для двухслойных армоцементных конструкций. **Метод.** Рассмотрены методы повышения огнестойкости железобетонных конструкций. Исследования направлены на разработку огнезащитных композитов с использованием вспученного вермикулита и вулканического пепла. Для улучшения физико-механических свойств огнезащитного композита разработана смесь портландцемента, гипса, извести, базальтового волокна, смолы древесной омыленной, вулканического пепла и вспученного вермикулита. Для исследования вермикулитобетонов, армированных базальтовой фиброй, использовался ротатбельный план второго порядка типа правильного шестиугольника. **Результат.** Предложены фибровермикулитобетоны, обладающие повышенными огнезащитными свойствами по сравнению с известными составами. Это происходит из-за лучшей сохранности фибровермикулитобетонного слоя при нагреве в результате фибрового армирования. Благодаря добавке СДО (смола древесная омыленная), повышаются огнезащитные свойства композита из-за дополнительной поризации фибровермикулитобетона. Получены параметры диаграммы «напряжения-деформации» вермикулитобетонного композита и мелкозернистого бетона. **Вывод.** Наилучшими огнезащитными свойствами обладают вермикулитобетоны со средней плотностью 480-560 кг/м<sup>3</sup>. Разработанные двухслойные армоцементные конструкции имеют высокую огнестойкость.

**Ключевые слова:** портландцемент, вспученный вермикулит, пепел, гипс, известь, смола древесная омыленная, базальтовое волокно, мелкозернистый бетон, армоцемент, средняя плотность, предел прочности на сжатие и изгиб, стандартный пожар, огнестойкость

**Для цитирования:** Т.А. Хежев, Г.Н. Хаджишалапов, Ф.М. Шогенова, А.Х. Артабаев, М.Х. Машукова. Свойства огнезащитного вермикулитобетонного композита и мелкозернистого бетона для двухслойных армоцементных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2): 165-176. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-165-176

**Properties of fire-retardant vermiculite-concrete composite and fine-grained concrete for two-layer reinforced cement structures**

**T.A. Khezhev<sup>1</sup>, G.N. Khadzhishalapov<sup>2</sup>, F.M. Shogenova<sup>1</sup>, A.Kh. Artabaev<sup>1</sup>, M.Kh. Mashukova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,  
<sup>1</sup>173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004, Russia,

<sup>2</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>2</sup>70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

**Abstract. Objective.** Development of compositions of fire-retardant vermiculite-concrete composites for reinforced cement structures. Investigation of the properties of fire-retardant vermiculite-concrete composite and fine-grained concrete for two-layer reinforced cement structures. **Method.** Methods for increasing the fire resistance of reinforced concrete structures are considered. Research is focused on the development of fire-retardant composites using expanded vermiculite and volcanic ash. To improve the physical and mechanical properties of the fire-retardant composite, a mixture of Portland cement, gypsum, lime, basalt fiber, saponified wood resin, volcanic ash and expanded vermiculite has been developed. For the study of vermiculite concretes reinforced with basalt fiber, a second-order rotatable plan of the regular hexagon type was used. **Result.** Fiber-vermiculite concretes are proposed, which have improved fire-retardant properties compared to known compositions. This is due to the better preservation of the fiber-vermiculite-concrete layer when heated as a result of fiber reinforcement. Also, thanks to the addition of SDO, the fire-retardant properties of the composite increase due to the additional porosity of the fiber-vermiculite-concrete. The parameters of the "stress-strain" diagram of a vermiculite-concrete composite and fine-grained concrete have been obtained. **Conclusion.** Vermiculite concretes with an average density of 480-560 kg/m<sup>3</sup> have the best fire-retardant properties. The developed two-layer reinforced cement structures have high fire resistance.

**Keywords:** portland cement, expanded vermiculite, ash, gypsum, lime, saponified wood resin, basalt fiber, fine concrete, reinforced cement, medium density, compressive and flexural strength, standard fire, fire resistance.

**For citation:** T.A. Khezhev, G.N. Khadzhashalapov, F.M. Shogenova, A.Kh. Artabaev, M.Kh. Mashukova. Properties of fire-retardant vermiculite-concrete composite and fine-grained concrete for two-layer reinforced cement structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(2):165-176. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-165-176

**Введение.** Рост количества пожаров в нашей стране и за рубежом отмечается с каждым годом. Обрушение строительных конструкций является главной причиной гибели людей и ущерба от пожаров [1]. Это связано с тем, что в современном строительстве при возведении зданий и сооружений все шире используются тонкостенные железобетонные конструкции из высокопрочного бетона.

В настоящее время большое внимание уделяется вопросу возможности последующего использования элементов железобетонных конструкций, подвергшихся действию высоких температур в условиях пожара [2, 3]. Предпочтительными, в таких случаях, являются железобетонные конструкции, обладающие возможностью повторного использования, без существенного их усиления после ремонта.

Бетоны, в которых используется дисперсное армирование, широко применяются при производстве пространственных тонкостенных конструкций, в частности, армоцементных [4-6]. Использование в строительстве армоцементных пространственных конструкций позволяет уменьшить расход материалов на 25–45 %, затраты труда на их производство и монтаж – до 15 % и снизить стоимость при механизации работ до 20 %.

В сравнении с железобетонными конструкциями, армоцементные конструкции обладают такими достоинствами как: меньший расход бетона до 50 % и стали – до 20 %; повышенные трещиностойкость, плотность и, как следствие, водонепроницаемостью.

При очевидных преимуществах тонкостенных пространственных конструкций, применение их в строительстве недостаточно. Низкий предел огнестойкости является причиной, препятствующей широкому применению пространственных конструкций. В связи с тенденцией к снижению толщины сечения и повышению прочности материала конструкций при увеличении пролета зданий, их огнестойкость снижается.

**Постановка задачи.** Создание железобетонных конструкций повышенной огнестойкости может выполняться следующими способами (рис. 1) [4]. Исследования [7] показали, что существенно повысить огнестойкость армоцементных конструкций путем увеличения размеров

поперечного сечения конструкций и толщины защитного слоя бетона арматуры невозможно. При этом теряются преимущества тонкостенных армоцементных конструкций из-за значительного утяжеления.



**Рис. 1. Пути повышения пределов огнестойкости тонкостенных железобетонных конструкций**

**Fig. 1. Ways to increase the fire resistance limits of thin-walled reinforced concrete structures**

Повышение огнестойкости увеличением статической неопределенности конструкций является экономичным, но малоэффективным способом [8].

Защита бетона от взрывообразного разрушения является эффективным способом повышения огнестойкости железобетонных конструкций [9]. Это позволяет более полно использовать огнестойкость конструкций, а при нанесении теплоизолирующих покрытий существенно повысить их огнестойкость.

Для повышения огнестойкости покрытий и перекрытий рекомендуют устройство подвесных потолков [10]. Подвесные потолки одновременно могут выполнять декоративные и акустические функции, могут служить для размещения встроенных светильников и воздухораспределителей. Вместе с тем, устройство подвесных потолков связано с большими трудозатратами, увеличением стоимости строительства, а также снижает архитектурную выразительность интерьера здания. Для максимального уменьшения массы огнезащитного слоя целесообразно применение вспучивающегося покрытия [11]. Во время пожара покрытие вспучивается с образованием пористых слоев, имеющих низкую теплопроводность.

Недостатками вспучивающихся огнезащитных покрытий являются: высокая стоимость, низкая долговечность и надежность, низкая щелочестойкость, что важно при использовании для железобетонных конструкций. Поэтому их применение для огнезащиты железобетонных конструкций не представляется целесообразным. При этом получить тонкостенные железобетонные конструкции высокой огнестойкости не представляется возможным. Огнезащитные плиты и штукатурки на основе вспученного вермикулита и минеральных вяжущих относятся к наиболее эффективным средствам повышения предела огнестойкости строительных конструкций [10].

Таким образом, анализ возможных способов повышения огнестойкости тонкостенных железобетонных конструкций показал, что наиболее эффективным и экономичным является защита конструкций теплоизоляционными материалами на основе вспученного вермикулита, обеспечивающие высокую огнестойкость конструкции при незначительном утяжелении [4, 12]. Благодаря таким свойствам вермикулита, как высокий коэффициент звукопоглощения [13],

приятный цвет (золотистый или серебристый) огнезащитное покрытие наряду с основной функцией – огнезащиты – может значительно улучшить акустические, теплоизоляционные и декоративные характеристики армоцементных конструкций [14].

Ранее проведенные исследования показали, что для огнезащиты строительных конструкций эффективны вермикулитобетоны со средней плотностью 500 – 800 кг/м<sup>3</sup> составов (вяжущее: вермикулит) 1 : 2, 1 : 3 и 1 : 4 по объему [4, 15 - 17]. Дальнейшее уменьшение средней плотности не приводит к повышению огнезащитных свойств и не достигается требуемая прочность вермикулитобетона [4].

Многочисленными исследованиями выявлено, что вермикулитобетоны на цементных вяжущих обладают высокими огнезащитными и эксплуатационными свойствами, что позволяет использовать их в различных областях строительства [4, 15, 16, 18]. Недостатками этих составов являются высокий расход портландцемента, относительно высокий коэффициент теплопроводности при высоких температурах во время пожара.

Одним из материалов, являющихся эффективной заменой части портландцемента и заполнителя для огнезащитных составов, могут быть вулканические горные породы. Используемый заполнитель – вулканический пепел является гидравлически активной тонкомолотой добавкой, то есть вступает в реакцию гидратации с составляющими цемента. Поэтому сульфатные и щелочные активизаторы можно применять для усиления гидравлической активности вулканического пепла.

**Методы исследования.** Исследования были направлены на разработку огнезащитных композитов с использованием вспученного вермикулита и вулканического пепла.

В экспериментах использовались: пепел фракции 0-0,16 мм Заюковского месторождения; вспученный вермикулит Санкт-Петербургской слюдяной фабрики фракции 0,16-5 мм; Белгородский портландцемент ПЦ500-ДО; негашеная известь; гипс марки Г-4-П-А; воздухововлекающая добавка смола древесная омыленная (СДО), базальтовая фибра изготовления ОАО «Ивотстекло» марки РНБ-9-1200-4с. Армоцемент армировали тканой сеткой № 8–07 (ГОСТ 3826–82) с размером ячейки 8×8 мм, диаметром проволоки 0,7 мм. При изготовлении конструкционного слоя применялся кварцевый песок с модулем крупности 2,2, максимальной фракции 5,0 мм. Состав мелкозернистой бетонной смеси – Ц : П = 1:2,5 с В/Ц = 0,4 ( $R_{сж} = 45$  МПа,  $R_{изг} = 5,3$  МПа).

Приготовление смеси производили в бетономешалке принудительного действия, в которой в воду с СДО последовательно загружали сухую смесь портландцемента, гипса, извести, базальтового волокна, вулканического пепла, затем – вспученного вермикулита, или предварительно перемешанную всухую смесь портландцемента, гипса, извести, базальтового волокна, вулканического пепла и вспученного вермикулита. Перемешивание всех компонентов продолжали до получения однородной огнезащитной фибровермикулитобетонной сырьевой смеси. Продолжительность перемешивания смеси составляла 1,5 – 2 мин.

Образцы размерами 4x4x16 см из вермикулитобетона уплотняли на стандартной виброплощадке. Подвижность смеси составляла 3-5 см по погружению конуса СтройЦНИЛ. Образцы хранились в воздушно-сухих условиях. Перед испытанием балочки высушивались при  $t = 105$  °С до постоянной массы в сушильном шкафу.

Использование вулканических горных пород может являться эффективной заменой части дорогостоящего вяжущего и вермикулита для огнезащитных бетонов. Вулканический пепел, являясь гидравлически активной тонкомолотой добавкой, способен вступать в реакцию гидратации с компонентами цемента.

Для повышения гидравлической активности вулканического пепла целесообразно использование активизаторов реакции (щелочных и сульфатных). В исследовании [19] показано, что в пенобетонах, с применением вулканических горных пород, можно заменить известью (50 %) и гипсом (2 %) цементное вяжущее. В связи с этим, в наших исследованиях для снижения

расхода цементного вяжущего в разрабатываемых огнезащитных бетонах активатором скрытой гидравлической активности вулканического пепла использовалась воздушная негашеная известь и строительный гипс. Результаты исследований приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Зависимость строительно-технических свойств вермикулитобетонов от соотношения компонентов в смеси**

**Table 1. The dependence of the construction and technical properties of vermiculite concrete on the ratio of components in the mixture**

№ составов	Соотношение компонентов в смеси, % по массе					Количество СДО в % от массы вяжущего	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа	
	цемент	вермикулит	пепел	известь	гипс			на сжатие	на изгиб
1	71,9	29,1	–	–	–	–	750	6,2	2,7
2	50,3	29,1	21,4	–	–	–	762	5,9	2,5
3	22,5	28,3	25,8	22,5	0,9	–	750	6	2,4
4	22,5	28,3	25,8	22,5	0,9	0,1	720	6,2	2,6
5	22,5	28,3	25,8	22,5	0,9	0,2	710	6,15	2,5
6	22,5	28,3	25,8	22,5	0,9	0,3	710	6	2,4
7	62,1	37,9	–	–	–	–	595	2,9	1,6
8	43,5	37,9	18,4	–	–	–	600	2,7	1,5
9	19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	–	590	2,8	1,4
10	19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	0,1	570	2,9	1,35
11	19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	0,2	560	2,8	1,3
12	19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	0,3	540	2,7	1,2
13	56,2	43,8	–	–	–	–	500	1,8	0,65
14	39,3	43,8	16,7	–	–	–	510	1,7	0,6
15	17,9	44,3	19,2	17,9	0,7	–	500	1,7	0,65
16	17,9	44,3	19,2	17,9	0,7	0,1	480	1,8	0,7
17	17,9	44,3	19,2	17,9	0,7	0,2	470	1,7	0,6
18	17,9	44,3	19,2	17,9	0,7	0,3	460	1,6	0,5

К недостаткам разработанных (табл. 1) вермикулитобетонов можно отнести хрупкость, относительно небольшие пределы прочности при сжатии и изгибе. Дисперсное фибровое армирование вермикулитобетонной матрицы может способствовать устранению указанных выше недостатков [20].

При исследовании вермикулитобетонов, армированных базальтовой фиброй, использовался ротатальный план второго порядка типа правильного шестиугольника [21, 22]. Состав и строительно-технические свойства исходной вермикулитобетонной матрицы показаны в табл. 2.

**Таблица 2. Состав и строительно-технические свойства исходной вермикулитобетонной матрицы**

**Table 2. Composition and construction and technical properties of the original vermiculite concrete matrix**

Соотношение компонентов в смеси The ratio of components in the mixture					Количество СДО в % от массы вяжущего Number SDO % by weight of binder	Средняя плотность Average density	Предел прочности Tensile strength	
цемент cement	вермикулит vermiculite	пепел ash	известь lime	гипс gypsum			На сжатие For compres.	На изгиб For bending
19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	0,1	570	2,8	1,4

В качестве варьируемых факторов выступали основные характеристики фибрового армирования:

$X_1$  – процент армирования по объему  $\mu_v$ , %;

$X_2$  – отношение длины волокон к их диаметру  $l/d$ .

Параметрами оптимизации являлись прочностные характеристики композита, определяемые после 28 суток естественного твердения:

$Y_1$  – предел прочности при сжатии  $R_{сж}$ , МПа;

$Y_2$  – предел прочности при изгибе  $R_{изг}$ , МПа.

Матрица эксперимента с принятыми основными уровнями варьирования приведена в табл. 3.

**Таблица 3. Матрица эксперимента**  
**Table 3. Experiment Matrix**

N/N	Натуральные переменные		Матрица эксперимента				
	$x_1$	$x_2$	$X_1$	$X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1 * X_2$
1	0,3	1444	-1	0	1	0	0
2	0,9	1444	+1	0	-1	0	0
3	0,75	2221	+0,5	+0,87	+0,25	+0,75	+0,43
4	0,75	667	+0,5	-0,87	+0,25	+0,75	-0,43
5	0,45	2221	-0,5	+0,87	+0,25	+0,75	-0,43
6	0,45	667	-0,5	-0,87	+0,25	+0,75	+0,43
7	0,6	1444	0	0	0	0	0

В табл. 4 и 5 представлены результаты испытаний образцов на сжатие и изгиб и их статистической обработки.

**Таблица 4. Экспериментальные данные результатов испытаний образцов на сжатие**  
**Table 4. Experimental data of the results of tests of specimens for compression**

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика $Y_1$ , МПа						Среднее значение $Y_1$ , МПа	Дисперсия $S_j^2$	Коэффициент вариации, %
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$			
1	3,6	3,55	3,48	3,65	3,7	3,62	3,6	0,01	0,02
2	3,15	3,25	3,2	3,1	3,3	3,4	3,23	0,01	0,03
3	2,9	2,7	2,7	2,8	2,55	2,85	2,75	0,02	0,05
4	2,5	2,7	2,8	2,4	2,55	2,75	2,62	0,02	0,06
5	3,15	3,05	2,9	2,95	3,2	2,8	3,01	0,02	0,05
6	3,2	3,2	3,1	3,15	3,17	2,95	3,13	0,01	0,03
7	3,55	3,7	3,75	3,6	3,57	3,6	3,63	0,01	0,02

**Таблица 5. Экспериментальные данные результатов испытаний образцов на изгиб**  
**Table 5. Experimental data of the results of testing specimens for bending**

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика $Y_2$ , МПа						Среднее значение $Y_2$ , МПа	Дисперсия $S_j^2$	Коэффициент вариации, %
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$			
1	1,6	1,7	1,45	1,4	1,5	1,48	1,52	0,01	0,07
2	2,6	2,7	2,5	2,45	2,4	2,55	2,53	0,01	0,04
3	1,8	1,95	1,99	1,65	1,75	1,9	1,84	0,02	0,07
4	1,92	1,8	1,75	1,7	1,8	1,82	1,8	0,01	0,04
5	2	2,05	1,9	2,15	2,2	2,25	2,09	0,02	0,06
6	1,97	2,2	2,3	2,3	2	1,95	2,12	0,03	0,08
7	2,6	2,58	2,75	2,85	2,5	2,4	2,61	0,03	0,06

Уравнения регрессии композита в кодированном виде получены по результатам экспериментальных исследований вермикулитобетона, армированных базальтовыми фибрами:

$$Y_1 = 3,6 - 0,2X_1 - 0,3X_1^2 - 0,9X_2^2 + 0,12X_1X_2 ;$$

$$Y_2 = 2,6 + 0,2X_1 - 0,65X_1^2 - 0,65X_2^2 .$$

Поверхности отклика построены по уравнениям регрессии (рис. 2).

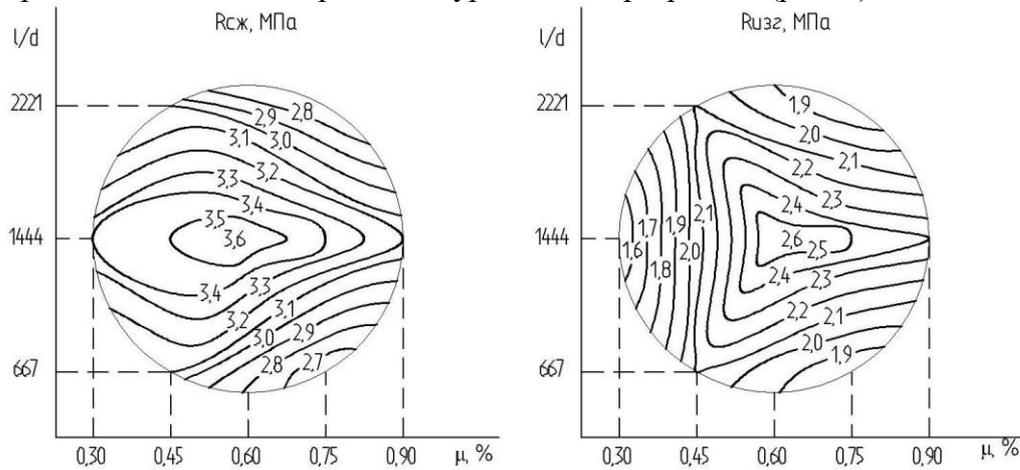


Рис. 2. Поверхности отклика:  $R_{сж}$  – предел прочности на сжатие, МПа;  $R_{изг}$  – предел прочности при изгибе, МПа;  $l/d$  – отношение длины волокон к их диаметру;  $\mu$  – процент армирования по объему

Fig. 2. Response surfaces:  $R_b$  – compressive strength, MPa;  $R_f$  – ultimate strength in bending, MPa; is the ratio of fiber length to their diameter;  $l/d$  – percentage of reinforcement by volume;  $\mu$  – percentage of reinforcement by volume

В ходе исследования выявлено, что при проценте армирования по объему  $\mu_v \approx 0,35 - 0,65 \%$  и отношении длины волокон к их диаметру  $l/d = 1444$  фибровермикулитобетон имеет максимальную прочность на сжатие, а на изгиб – при значениях  $\mu_v \approx 0,6 - 0,85 \%$  и  $l/d = 1444$ .

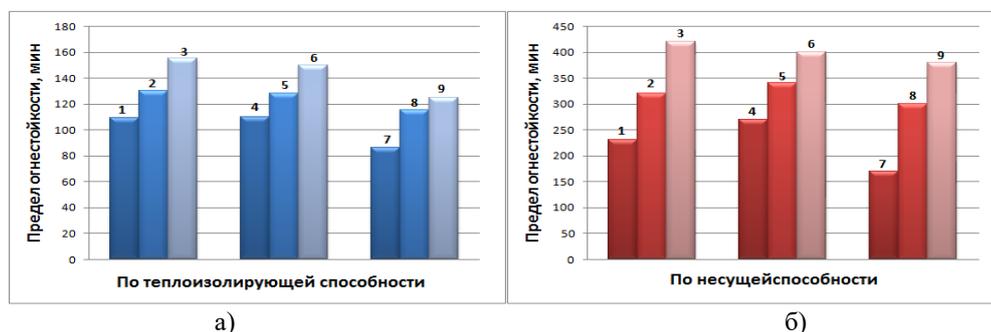
Дальнейшее повышение процента фибрового армирования бетонной матрицы ведет к снижению прочности фибровермикулитобетона на сжатие и изгиб, что объясняется ухудшением их структуры. Таким образом, фибровое армирование вермикулитобетонной матрицы увеличивает предел прочности композита на изгиб от 55 до 75 % (рис. 2).

Проведены исследования огнезащитных свай, разработанных огнезащитных композитов. Испытания профессора Жежева Т.А. [4] на огнестойкость двухслойных армоцементных плит размером 62,5x50 см в огневой печи и образцов размером 19x19 см в электрической печи в горизонтальном положении по «стандартному» температурному режиму пожара показали расхождение результатов менее 5 %.

Поэтому испытания по определению огнестойкости двухслойных армоцементных элементов проводились нами на образцах 19x19 см в горизонтальном положении на электрической муфельной печи по температурному режиму «стандартного» пожара, в соответствии с ГОСТ 30247.1–94. За наступление предела огнестойкости по несущей способности ( $R$ ) образцов условно принимали момент достижения тканой сеткой, расположенной в армоцементном слое, температуры 300 °С. В соответствии с ГОСТ 30247.1–94, за наступление предела огнестойкости по теплоизолирующей способности ( $I$ ) образцов принимали момент повышения температуры на необогреваемой поверхности образца в среднем более чем на 140 °С в сравнении с температурой образца до испытания.

В момент испытания влажность мелкозернистого бетона была 3–4 %, а для вермикулитобетона – 8–10 %. Нарушение целостности двухслойных армоцементных образцов при прове-

дении испытаний на огнестойкость не наблюдалось. Результаты натуральных испытаний двухслойных армоцементных образцов (толщина слоя мелкозернистого бетона – 20 мм, вермикулитобетона – 25 мм) на огнестойкость приведены на рис. 3.



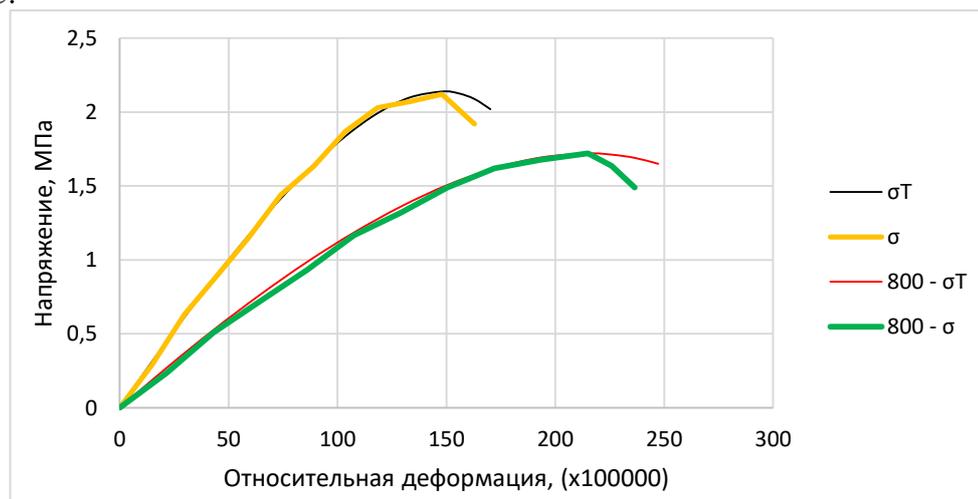
**Рис. 3.** Влияние состава огнезащитного слоя на предел огнестойкости двухслойных армоцементных образцов по признаку потери теплоизолирующей способности (а) и несущей способности (б): 1, 4, 7 – цементный вермикулитобетон (500, 595, 740); 2, 5, 8 – вермикулитобетонный композит (480, 570, 730); 3, 6, 9 – фибровермикулитобетонный композит (470, 560, 720)

**Fig. 3.** The influence of the composition of the fire-retardant layer on the fire resistance limit of two-layer reinforced cement samples on the basis of the loss of heat-insulating ability (a) and bearing capacity (b): 1, 4, 7 – cement vermiculite concrete (500, 595, 740); 2, 5, 8 – vermiculite concrete composite (480, 570, 730); 3, 6, 9 – fiber vermiculite concrete composite (470, 560, 720)

Исходя из результатов экспериментов, предложенные фибровермикулитобетоны обладают лучшими огнезащитными свойствами по сравнению с другими составами. Это происходит из-за лучшей сохранности фибровермикулитобетонного слоя при нагреве в результате фибрового армирования. Также благодаря добавке СДО, происходит повышение огнезащитных свойств из-за дополнительной поризации фибровермикулитобетона.

Наилучшие огнезащитные свойства выявлены у вермикулитобетонов со средней плотностью 480-560 кг/м<sup>3</sup>. Для расчета огнестойкости двухслойных армоцементных конструкций необходимо знать деформационные характеристики вермикулитобетона и мелкозернистого бетона при высоких температурах.

На рис.4 представлена диаграмма «напряжения-деформации» вермикулитобетона для огнезащитного слоя после твердения в нормальных условиях и после кратковременного нагрева до 800 °С.



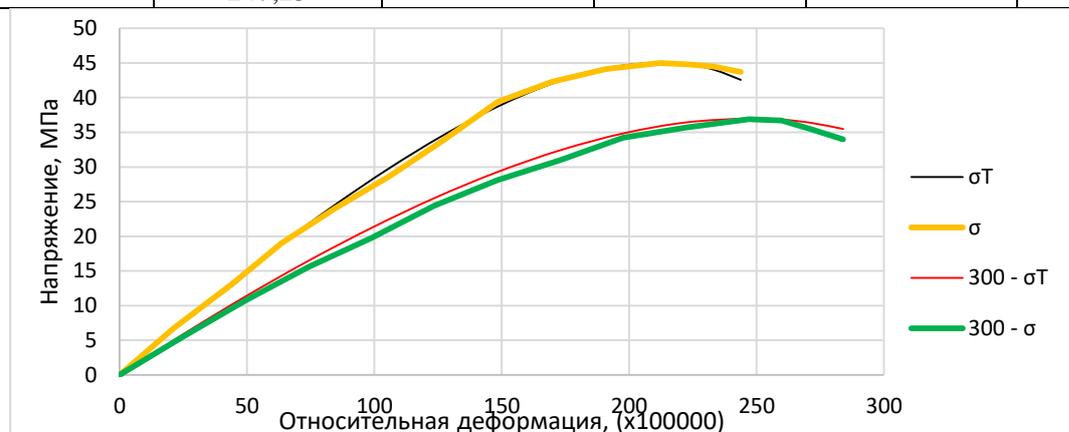
**Рис. 4.** Диаграмма «напряжения-деформации» вермикулитобетона  $\sigma_T$  – по формуле Сарджина; 800 – после кратковременного нагрева до 800°C

**Fig. 4.** Diagram of "stress-strain" of vermiculite concrete  $\sigma_T$  - according to Sargin's formula; 800 - after short-term heating up to 800°C

В табл.6 приведены параметры диаграммы «напряжения-деформации» вермикулитобетона.

**Таблица 6. Параметры диаграммы «напряжения-деформации» вермикулитобетона**  
**Table 6. Parameters of the "stress-strain" diagram of vermiculite concrete**

Напряжение, Stress МПа	Относительная деформация, Relative deformation x100000	$E_0$ , МПа	$\epsilon_R$ , x100000	$\lambda_R$	k
Условия твердения - нормальные Hardening conditions - normal					
0	0	2120	149	0,676	1,48
0,29	14,8				
0,63	29,6				
0,89	44,4				
1,15	59,2				
1,44	74				
1,63	88,8				
1,87	103,6				
2,03	118,4				
2,07	133,2				
2,12	148				
2,02	155,4				
1,92	162,8				
После кратковременного нагрева до 800°C After short heating up to 300°C					
0	0	1185	215	0,622	1,608
0,235	21,5				
0,51	43				
0,721	64,5				
0,932	86				
1,166	107,5				
1,32	129				
1,49	150,5				
1,62	172				
1,677	193,5				
1,72	215				
1,636	225,75				
1,49	236,5				
	247,25				



**Рис. 5. Диаграмма «напряжения-деформации» мелкозернистого бетона  $\sigma_T$  – по формуле Сарджина; 300 – после кратковременного нагрева до 300°C**

**Fig. 5. Diagram of "stress-strain" of fine-grained concrete  $\sigma_T$  - according to Sargin's formula; 300 - after short-term heating up to 300°C**

На рис.5 представлена диаграмма «напряжения-деформации» мелкозернистого бетона для несущего слоя после твердения в нормальных условиях и после кратковременного нагрева до 300°C.

В табл. 7 приведены параметры диаграммы «напряжения-деформации» мелкозернистого бетона.

**Таблица 7. Параметры диаграммы «напряжения-деформации» мелкозернистого бетона**  
**Table 7. Parameters of the "stress-strain" diagram of fine-grained concrete**

Напряжение, МПа Stress	Относительная деформация, Relative deformation x100000	$E_0$ , МПа	$\epsilon_R$ , x100000	$\lambda_R$	k
Условия твердения - нормальные Hardening conditions - normal					
0	0	29450	212	0,725	1,38
6,7	21,2				
13,1	44,2				
19	63,6				
24,1	84,8				
28,7	106				
33,9	127,2				
39,4	148,4				
42,3	169,6				
44,1	190,8				
45	212				
44,8	222,6				
44,5	233,2				
После кратковременного нагрева до 300°C After short heating up to 300°C					
0	0	21710	223	0,764	1,308
5,49	24,7				
10,74	49,4				
15,58	74,1				
19,76	98,8				
24,4	123,5				
28,1	148,2				
31	172,9				
34,2	197,6				
35,7	222,3				
36,9	247				
36,7	259,8				
35,4	271,7				
34	284				

**Вывод.** Разработаны эффективные фиброармированные огнезащитные композиты с применением вспученного вермикулита и вулканического пепла.

Фибровермикулитобетонные композиты со средней плотностью 480-560 кг/м<sup>3</sup> имеют более высокие огнезащитные свойства.

Диаграммы «напряжения-деформации» характеризуются параметрами: огнезащитного вермикулитобетона до нагрева:  $R_{bn} = 2,1$ ,  $E_0 = 2120$ ,  $\epsilon_R = 0,00149$ ,  $\lambda_R = 0,676$ ,  $k = 1,48$ , после кратковременного нагрева до 800 °C:  $R_{bn} = 1,7$ ,  $E_0 = 1185$ ,  $\epsilon_R = 0,00215$ ,  $\lambda_R = 0,622$ ,  $k = 1,608$ ; мелкозернистого бетона до нагрева:  $R_{bn} = 45,1$ ,  $E_0 = 29450$ ,  $\epsilon_R = 0,00212$ ,  $\lambda_R = 0,725$ ,  $k = 1,38$ , по-

сле кратковременного нагрева до 300 °С:  $R_{bn} = 36,9$ ,  $E_o = 21710$ ,  $\varepsilon_R = 0,00223$ ,  $\lambda_R = 0,764$ ,  $k = 1,308$ , и удовлетворительно описываются формулой Сарджина.

#### Библиографический список:

1. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. М.: Стройиздат. 1986. 225 с.
2. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. М.: Стройиздат. 1979. 128 с.
3. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций после пожара. М.: 2005. 122 с.
4. Хежев Т.А. Технология армоцементных конструкций высокой огнестойкости с теплозащитным слоем из эффективного легкого бетона: дисс. ... д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону. 2007. 304 с.
5. Лысенко Е.Ф. Армоцементные конструкции. Киев: Вища школа. 1981. 191 с.
6. Митрофанов Е.Н. Армоцемент. Л.: 1973. 208 с.
7. Панарин С.Н., Хежев Т.А., Сомов В.И. Огнестойкость армоцемента с огнезащитным слоем на основе вспученного вермикулита // Пути повышения огнестойкости строительных материалов и конструкций: материалы семинара МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского. М.: 1982. С. 98–101.
8. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат. 1888. 142 с.
9. Некрасов К.Д. Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре. М.: Стройиздат. 1981. 21 с.
10. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин А.М. Огнезащита строительных конструкций. М.: ТИМР. 2000. 433 с.
11. Ахтямов Р.Я. «Вермивол» – новое огнезащитное покрытие на основе вспученного вермикулита // Строительные материалы. 2002. № 6. С. 6–7.
12. Панарин С.Н. Армоцементные конструкции повышенной огнестойкости: наглядное пособие. Л.: ЛДНТП. 1982. 23 с.
13. Дубенецкий К.Н., Пожнин А.П. Вермикулит. Л.: Стройиздат. 1971. 175 с.
14. Геденов П.П., Спирина В.С. Цементно-вермикулитовые штукатурные растворы для жилых и общественных зданий // Строительные материалы на основе вермикулита, шлаков и зол: сб. трудов УралНИИСтромпроект. Челябинск. 1975. С. 24 – 30.
15. Руководство по выполнению огнезащитных и теплоизоляционных штукатурок механизированным способом. М.: Стройиздат. 1977. 46 с.
16. Руководство по составам и применению теплоизоляционных и огнестойких перлитовых штукатурок. М.: Стройиздат. 1975. 15 с.
17. Тихонов Ю.М. Аэрированные легкие и тепло-огнезащитные бетоны и растворы с применением вспученного вермикулита и перлита и изделия на их основе: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский гос. архит.-строит. ун-т. 2005. 40 с.
18. Дубенецкий К.Н., Тихонов Ю.М. Новый изоляционный материал // Пожарное дело. 1967. № 6. С. 30–31.
19. Хашукаев М.Н. Технология и свойства ячеистых фибробетонов на основе вулканических горных пород: дисс... к.т.н. СПб.: Санкт-Петербургский гос. архит.-строит. ун-т. 2002. 127 с.
20. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография / 3-е изд., перераб. и доп. М.: АСВ. 2004. 560 с.
21. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука. 1965. 340 с.
22. Крыжановский И.И., Свицерская О.И. Методика планирования эксперимента при решении типовой задачи о выборе химических добавок к бетону // Математические методы в исследованиях технологии бетона: тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инженер. гидрогеологии. Вып. 5. Харьков. 1971. С. 102–114.

#### References:

1. Milovanov A.F. Fire resistance of reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat. 1986. 225 p. (In Russ).
2. Ilyin N.A. Consequences of fire impact on reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat. 1979:128. (In Russ).
3. Milovanov A.F. Fire safety of reinforced concrete structures after a fire. M.: 2005: 122. (In Russ).
4. Khezev T.A. Technology of reinforced cement structures of high fire resistance with a heat-shielding layer of efficient light-weight concrete: diss. ... Dr. tech. Sciences. Rostov-on-Don. 2007: 304. (In Russ).
5. Lysenko E.F. Armored structures. Kyiv: Vishcha school. 1981: 191.
6. Mitrofanov E.N. Armocement. L.: 1973: 208. (In Russ).
7. Panarin S.N., Khezhev T.A., Somov V.I. Fire resistance of reinforced cement with a fire-retardant layer based on expanded vermiculite. F. E. Dzerzhinsky. M.: 1982; 98–101. (In Russ).
8. Yakovlev A.I. Calculation of fire resistance of building structures. Moscow: Stroyizdat. 1888: 142. (In Russ).
9. Nekrasov K.D. Recommendations for the protection of concrete and reinforced concrete structures from brittle fracture in a fire. Moscow: Stroyizdat. 1981: 21. (In Russ).
10. Strakhov V.L., Krutov A.M., Davydkin A.M. Fire protection of building structures. M.: TIMR. 2000: 433 (In Russ).
11. Akhtyamov R.Ya. "Vermivol" - a new fire-retardant coating based on expanded vermiculite. Construction materials. 2002; 6: 6–7. (In Russ).
12. Panarin S.N. Reinforced cement structures of increased fire resistance: a visual aid. L.: LDNTP. 1982:23 (In Russ).
13. Dubenetsky K.N., Pozhnin A.P. Vermiculite. L.: Stroyizdat. 1971: 175. (In Russ).

14. Gedeonov P.P., Spirina V.S. Cement-vermiculite plaster mortars for residential and public buildings. *Building materials based on vermiculite, slags and ashes: coll. Proceedings of UralNIISromproekt*. Chelyabinsk. 1975: 24 - 30. (In Russ).
15. Guidelines for the implementation of fire-retardant and heat-insulating plasters in a mechanized way. Moscow: *Stroyizdat*. 1977: 46. (In Russ).
16. Guidelines for the composition and use of heat-insulating and fire-resistant perlite plasters. Moscow: *Stroyizdat*. 1975.: 15. (In Russ).
17. Tikhonov Yu.M. Aerated lightweight and heat-fire-retardant concretes and mortars using expanded vermiculite and perlite and products based on them: author. diss. ... Dr. tech. Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg State University. architect.-builds. un-t. 2005. 40 p. (In Russ).
18. Dubenetsky K.N., Tikhonov Yu.M. New insulating material *Fire business*. 1967; 6: 30–31. (In Russ).
19. Khashukaev M.N. Technology and properties of cellular fiber-reinforced concrete based on volcanic rocks: diss. Ph.D. St. Petersburg: St. Petersburg State University. architect.-builds. un-t. 2002. 127 p. (In Russ).
20. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction: monograph / 3rd ed., revised. and additional M.: ASV. 2004; 560. (In Russ).
21. Nalimov V.V., Chernova N.A. Statistical methods for planning extreme experiments. M.: *Science*. 1965: 340 (In Russ).
22. Kryzhanovskiy I.I., Sviderskaya O.I. Experiment planning technique for solving a typical problem on the choice of chemical additives to concrete. *Mathematical methods in research of concrete technology: tr. All-Union. scientific research in-ta water supply, sewerage, hydraulic engineering. facilities and engineer. hydrogeology. Issue. 5. Kharkov. 1971: 102–114.*

**Сведения об авторах:**

Хежев Толя Амирович, доктор технических наук, профессор, директор института архитектуры, строительства и дизайна, заведующий кафедрой строительного производства; [hejev\\_tolya@mail.ru](mailto:hejev_tolya@mail.ru)

Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства; [yarus-x@mail.ru](mailto:yarus-x@mail.ru)

Шогенова Фатима Мухамедовна, аспирант кафедры строительного производства; [shogenova-1982@mail.ru](mailto:shogenova-1982@mail.ru)

Артабаев Адам Хатуевич, аспирант кафедры строительного производства; [adam.artabaev@gmail.com](mailto:adam.artabaev@gmail.com)

Машукова Марита Хамидовна, аспирант кафедры строительного производства; [mashukovamarita@yandex.ru](mailto:mashukovamarita@yandex.ru)

**Information about the authors:**

Tolya A. Khezhev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Director of the Institute of Architecture, Construction and Design, Head of the Department of Construction Production; [hejev\\_tolya@mail.ru](mailto:hejev_tolya@mail.ru)

Gadzhimagomed N. Khadzhishalapov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; [yarus-x@mail.ru](mailto:yarus-x@mail.ru)

Fatima M. Shogenova, Postgraduate Student, Department of Building production; [shogenova-1982@mail.ru](mailto:shogenova-1982@mail.ru)

Adam Kh. Artabaev, Postgraduate Student, Department of Building production; [adam.artabaev@gmail.com](mailto:adam.artabaev@gmail.com)

Marita Kh. Mashukova, Postgraduate Student, Department of Building production; [mashukovamarita@yandex.ru](mailto:mashukovamarita@yandex.ru)

**Конфликт интересов. Conflict of interest.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 24.05.2021.

Одобрена после рецензирования / Revised 10.06.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 10.06.2022.