

Фиброгипсопеплоцементобетонные композиты с полидисперсным армированием

Т.А. Хежев, Ф.М. Шогенова

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

Аннотация: Представлены результаты исследований прочностных свойств полидисперсно армированных композитов на основе гипсопеплоцементных вяжущих. Используются материалы: Г–5 БП по ГОСТ 125-2018 Усть-Джегутинского гипсового комбината, портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2020 ПАО «Белгородский цемент», вулканический пепел с максимальной крупностью зерен 5 мм Заюковского месторождения, полипропиленовая фибра RS производства Руссеал, базальтовые волокна марки РНБ-9-1200-4с производства ПАО «Ивотстекло». Повышение предела прочности при сжатии вследствие дисперсного армирования достигает 16 % в возрасте 2 ч и 19 % в возрасте 28 сут, при изгибе, соответственно, на 69 % и 75 % относительно неармированного бетона аналогичного состава. Уровень прочности при сжатии не менее 90 % от максимального значения прочности имеет место при отношении l/d в диапазоне от 1100 до 1800, при изгибе не менее 90 % от максимального значения прочности имеет место при любом отношении l/d при коэффициенте армирования $\mu = 1,3$ %. При армировании базальтовым волокном в сочетании с полипропиленовой фиброй предел прочности при сжатии составляет 1,67 раза независимо от возраста. Увеличение предела прочности при изгибе составляет от 2,17 раза через 2 ч до 2,3 раза через 28 сут. Параметры полидисперсного армирования не оказывают значительного влияния на зависимость $R_f = f(R)$ исследованных композитов.

Ключевые слова: гипсопеплоцементные вяжущие, полидисперсное армирование, композиты, предел прочности при сжатии и изгибе.

Введение

Одной из актуальных задач современного материаловедения является разработка новых эффективных композитов с низкой себестоимостью и улучшенными физико-механическими характеристиками на основе

техногенного сырья и местных материалов. Основным минеральным вяжущим в производстве строительных материалов на данный момент является портландцемент, производство и применение которого в России составляет более 80 % от общего объема минеральных вяжущих [1,2].

Вместе с тем удельные капиталовложения гипсовых предприятий в 2 и материалоемкостью оборудования в 3 раза по сравнению с цементными (соответственно), а оборачиваемость форм при производстве изделий возрастает до 15 раз [1,2].

Создание композитов с использованием комбинированных вяжущих, эффективных заполнителей и дисперсного армирования позволяет преодолеть многие недостатки гипсовых вяжущих и изделий [3].

В качестве заполнителей и активных минеральных добавок эффективно могут быть использованы вулканические пеплы, ранее ограниченно применявшиеся при изготовлении фиброгипсобетонов [4].

Имеется успешный опыт производства гипсоцементнопуццоланового вяжущего ориентировочного состава 65–50 % строительный гипс, 20–25 % ПЦ, 15–25 % трепел [5].

Дисперсно-армированные бетоны сочетают бетонную матрицу, обладающую сравнительно небольшой прочностью при растяжении и армирующие волокна, характеризующиеся значительным сопротивлением разрыву и более высоким по сравнению с матрицей модулем упругости [6,7]. Армирующие волокна могут иметь направленную или произвольную ориентацию в объеме матрицы [8,9].

Волокна из карбида и нитрида кремния, бора, углерода, графита, базальта, диабазы по удельной прочности в несколько раз превосходят сталь и выдерживают температуру до 2000 °С [10,11].

Низкомодульные неметаллические волокна (синтетические и некоторые виды химических и растительных) имеют прочность на

растяжение от 20 до 1300 МПа и модуль упругости от $1,3 \cdot 10^3$ до $30 \cdot 10^3$ МПа, высокомодульные минеральные волокна имеют прочность на растяжение от 700 до 25000 МПа и модуль упругости от $7 \cdot 10^3$ до $400 \cdot 10^3$ МПа [9,10].

Дисперсное армирование позволяет существенно повысить прочность, истираемость, ударную вязкость и трещиностойкость бетонной матрицы [12,13].

В работах [14,15] доказана эффективность сочетания высокомодульных и низко модульных волокон для армирования бетонной матрицы, т. е. комбинированное дисперсное армирование.

Целью настоящего исследования является разработка способов производства и исследование прочностных свойств полидисперсно армированных композитов на основе гипсопеплоцементных вяжущих.

Материалы и методика исследований

Экспериментальные исследования выполнены с использованием гипсопеплоцементобетонной матрицы, строительно-технические свойства которой представлены в табл. 1.

Таблица 1

Строительно-технические свойства гипсопеплоцементобетонной матрицы

Г : П, по массе	ПЦ, %	Свойства матрицы				
		ρ^*	R_f , (МПа) в возрасте		R , (МПа) в возрасте	
			2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	2	3	4	5	6	7
1:1	20	1195	2,3	4,0	5,4	7,6

Примечание: * - средняя плотность в возрасте 28 сут, кг/м³;
 R_f - предел прочности при изгибе; R - предел прочности при сжатии

Использовались материалы:

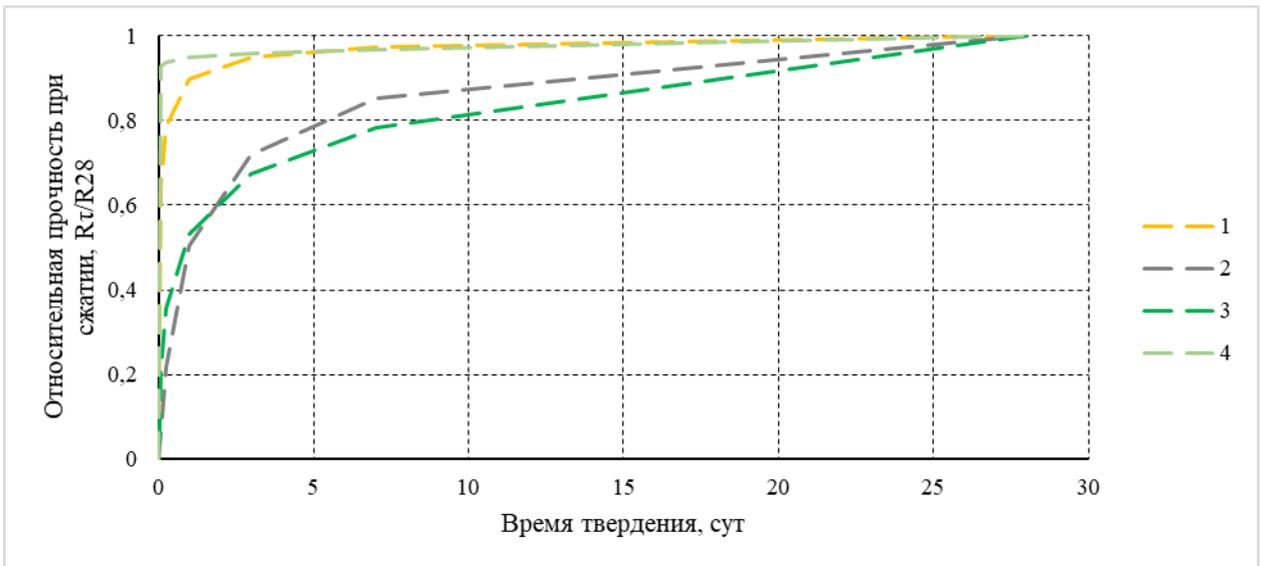
- гипс строительный Г–5 БП по ГОСТ 125-2018 Усть-Джегутинского гипсового комбината (далее по тексту Г);
- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2020 ПАО «Белгородский цемент» (далее по тексту ПЦ);
- вулканический пепел с максимальной крупностью зерен 5 мм Заюковского месторождения (далее по тексту П).
- полипропиленовая фибра RS производства Руссеал длиной 12 мм;
- базальтовые волокна марки РНБ-9-1200-4с производства ПАО «Ивотстекло».

Процент дисперсного армирования по объему изменялся от 1,1 до 1,5 % для базальтового волокна и от 0,35 до 0,48 % для полипропиленовой фибры.

Формование образцов размером 4x4x16 см осуществлялось литьевым способом с последующим выдерживанием в воздушно-сухих условиях. Предел прочности при сжатии и изгибе в возрасте 2 ч и 28 сут определялся по ГОСТ 23789-2018.

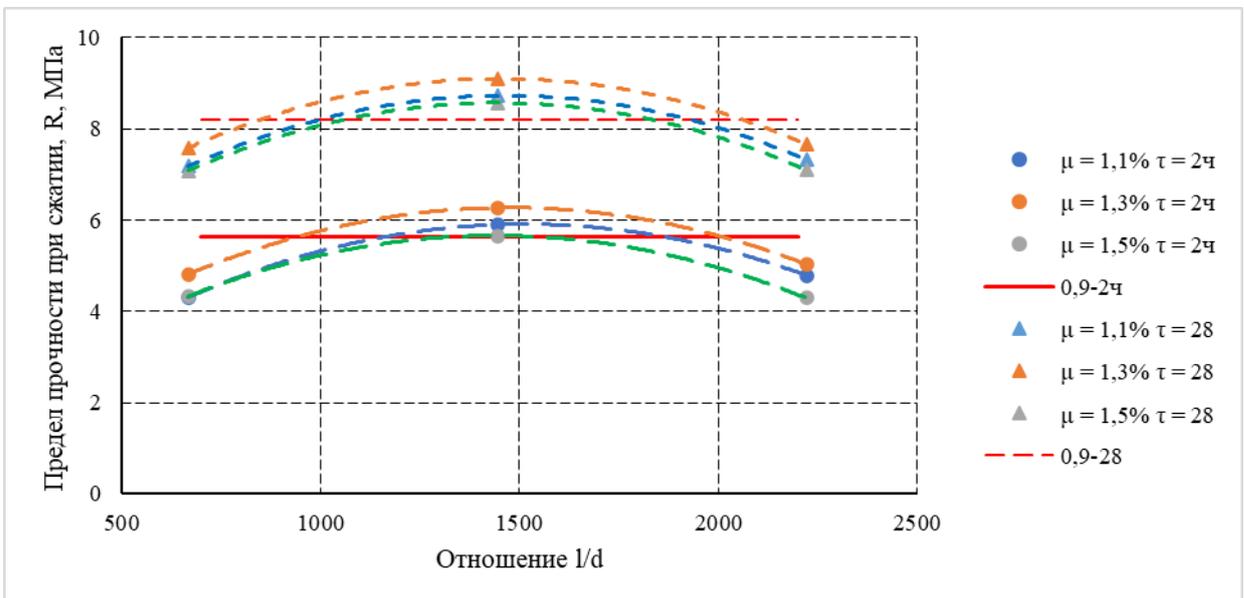
Результаты исследований

На рис. 1 представлена относительная прочность при сжатии от времени твердения матрицы по табл. 1. На рис. 2 представлена зависимость предела прочности при сжатии исследованных композитов с базальтовыми волокнами от соотношения длина волокна/диаметр l/d , а на рис. 3 - зависимость предела прочности при изгибе. На рис. 4 представлена зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии исследованных композитов с базальтовыми волокнами.



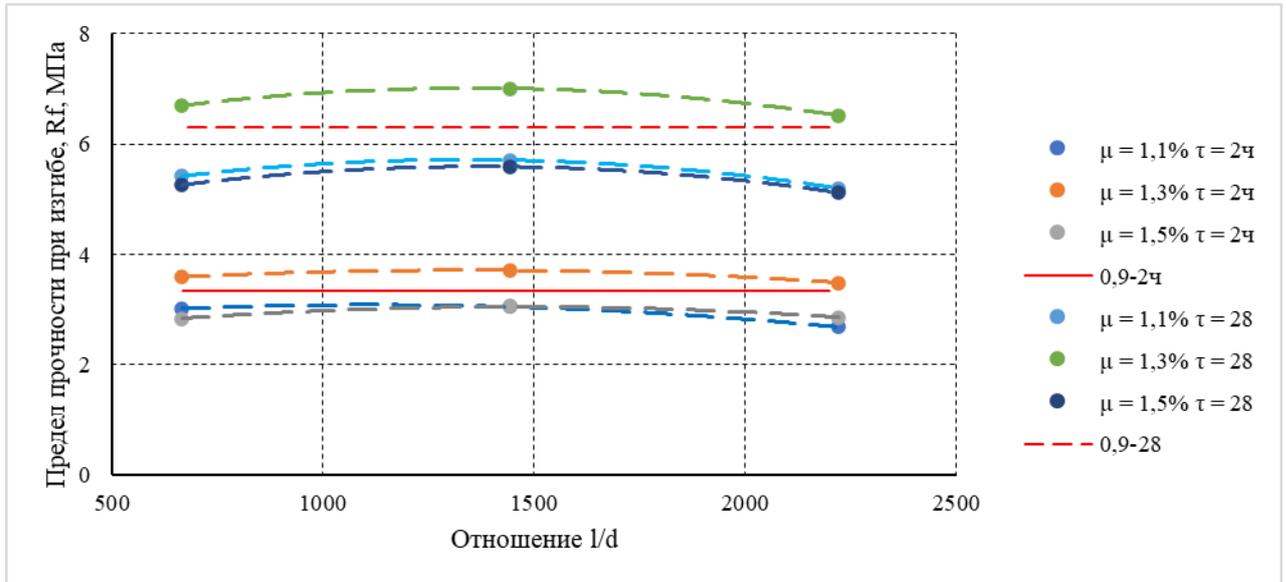
1 – исследованные композиты; 2 – особобыстротвердеющие портландцементные бетоны [16]; 3 – глиноземистый цемент по ГОСТ 969-2019; 4 – по данным [17] для растворов на смешанном вяжущем ПЦ+ГЦ

Рис. 1 – Зависимость относительной прочности при сжатии от времени твердения



2 ч, 28 – время твердения 2 ч и 28 сут;
0,9-2ч, 0,9-28 – 90 % уровень от максимума в 2 ч и 28 сут

Рис. 2. – Зависимость предела прочности при сжатии исследованных композитов от соотношения длина волокна/диаметр l/d

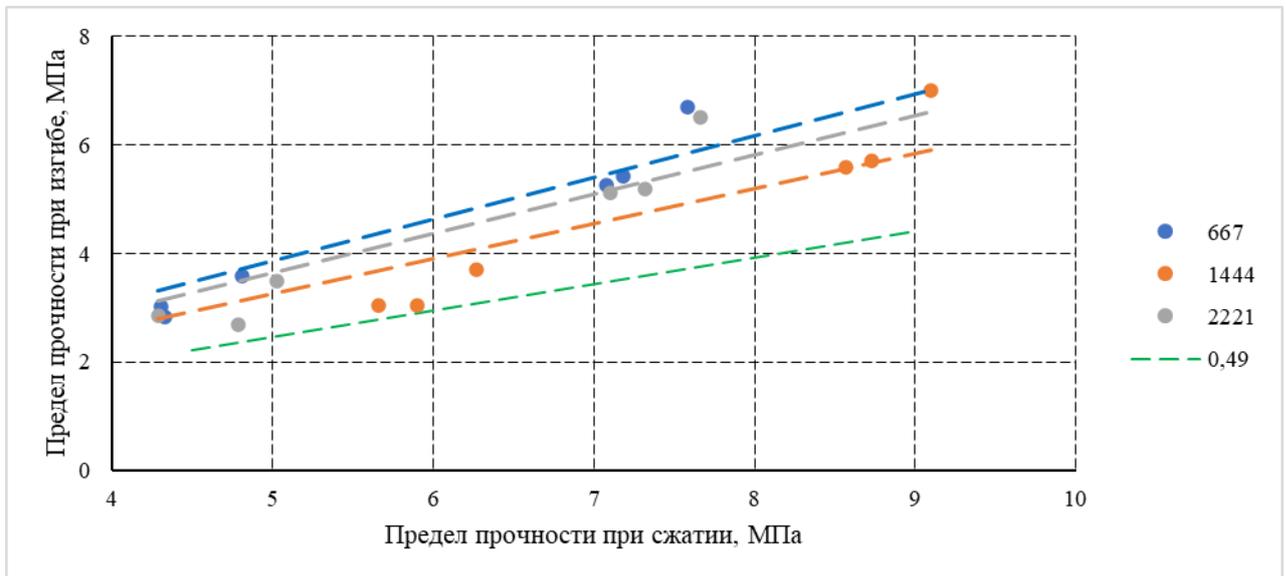


2 ч, 28 – время твердения 2 ч и 28 сут;

0,9-2ч, 0,9-28 – 90 % уровень от максимума в 2 ч и 28 сут

Рис. 3. – Зависимость предела прочности при изгибе

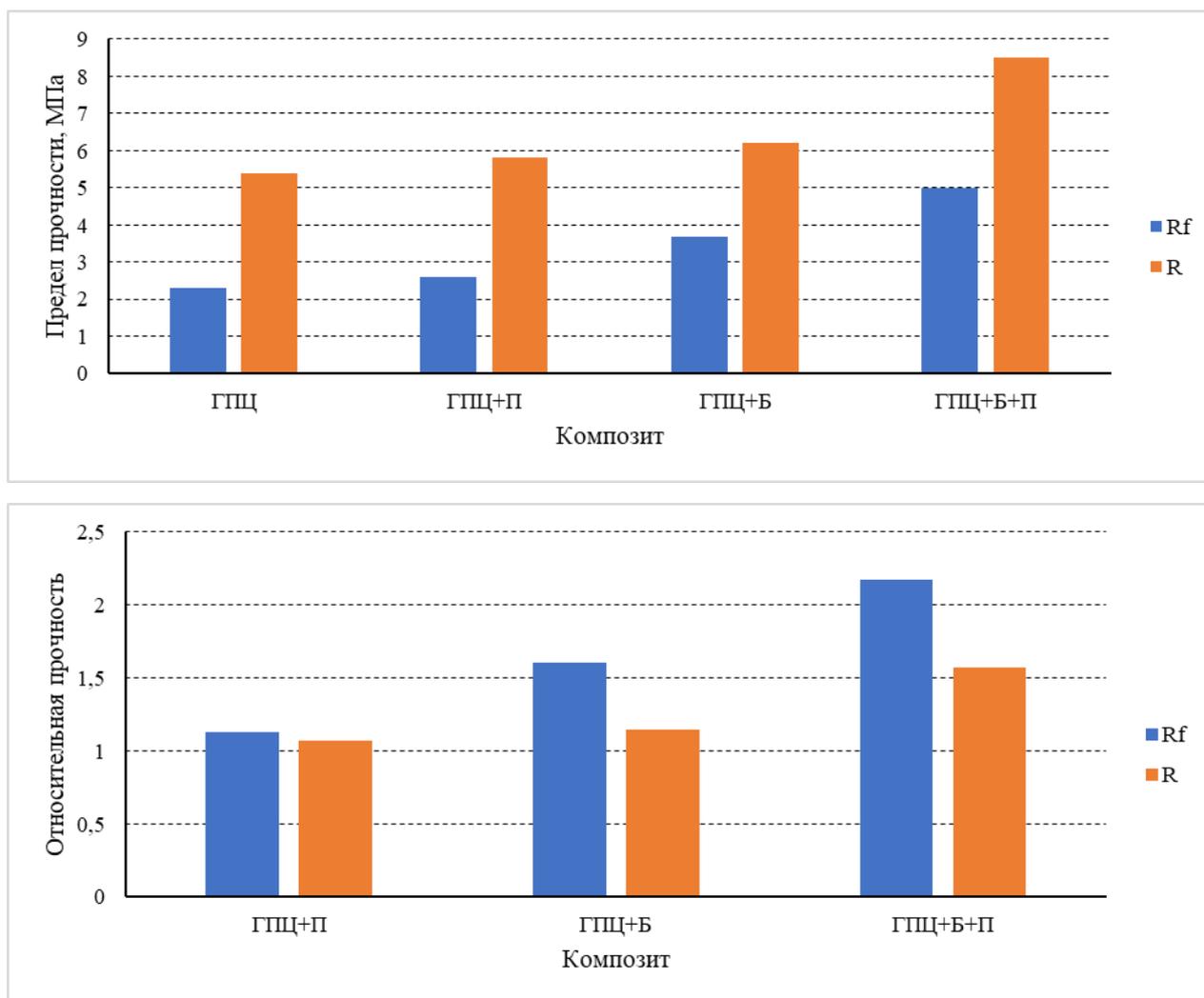
исследованных композитов от соотношения длина волокна/диаметр (l/d)



667-2221 – соотношение l/d волокон; 0,49 – матрица по табл. 1

Рис. 4 – Зависимость предела прочности при изгибе R_f исследованных композитов от предела прочности при сжатии R

На рис. 5 представлены значения пределов прочности при сжатии и изгибе в возрасте 2 ч исследованных композитов с моно и полидисперсным армированием с параметрами: базальтовые волокна 1,3 %, полипропиленовая фибра 0,42 %.

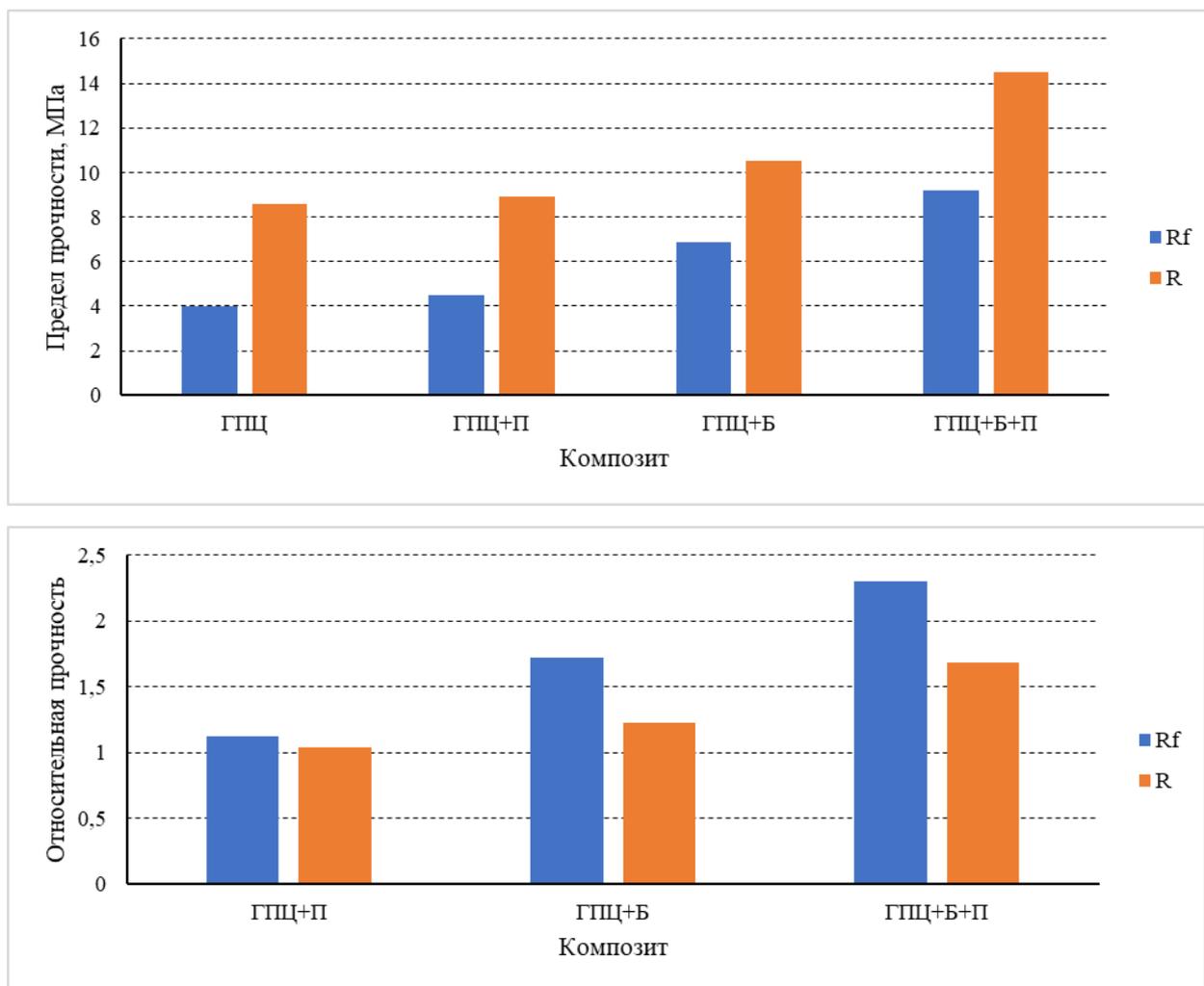


Вверху – абсолютные, внизу – относительно неармированного состава;

ГПЦ – гипс+пепел+цемент

Рис. 5 – Пределы прочности при изгибе и сжатии образцов различного состава в возрасте 2 ч

На рис. 6 представлены значения пределов прочности при сжатии и изгибе в возрасте 28 сут исследованных композитов с моно и полидисперсным армированием с параметрами: базальтовые волокна 1,3 %, полипропиленовая фибра 0,42 %.



Вверху – абсолютные, внизу – относительно неармированного состава;

ГПЦ – гипс+пепел+цемент

Рис. 6 – Пределы прочности при изгибе и сжатии образцов различного состава в возрасте 28 сут

На рис. 7 представлена зависимость $R_f = f(R)$ исследованных композитов с учетом таких факторов, как параметры армирования и время твердения.

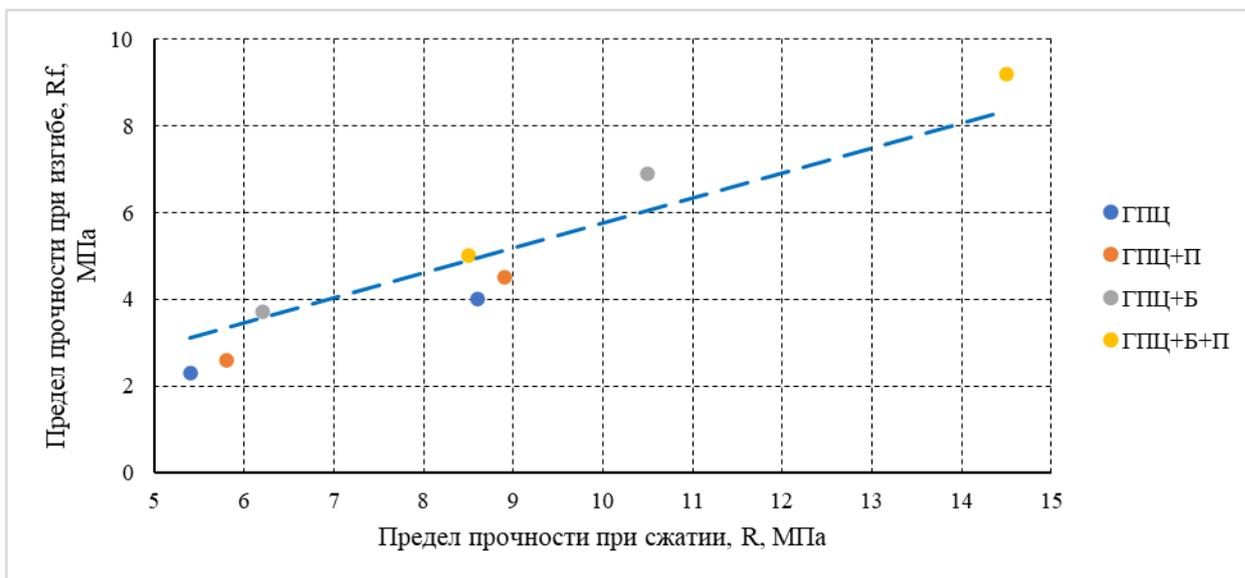


Рис. 7 – Зависимость предела прочности при изгибе R_f исследованных композитов от предела прочности при сжатии R

Анализ результатов

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

- максимальное значение предела прочности при сжатии R как через 2 ч твердения, так и в возрасте 28 сут имеет место при значении отношения длины волокна l к диаметру d равном 1444, повышение предела прочности относительно других параметров армирования через 2 ч достигает 36 %, а через 28 сут – 20 %;

- влияние процента армирования по объему μ менее выраженное, относительно минимальных значений прочности максимальные достигают 10 % через 2 ч и 6 % через 28 сут, при этом максимум имеет место при проценте армирования 1,3;

- уровень прочности не менее 90 % от максимального значения прочности имеет место при отношении l/d в диапазоне от 1100 до 1800;

- максимальное значение предела прочности при изгибе R_f как через 2 ч твердения, так и в возрасте 28 сут имеет место при значении отношения длины волокна l к диаметру d равном 1444 как через 2 ч твердения, так и в возрасте 28 сут, при этом повышение предела прочности относительно других параметров армирования не превышает 7 %;

- влияние процента армирования по объему μ менее выраженное, относительно минимальных значений прочности максимальные достигают всего 3 % через 2 ч и 6 % через 28 сут, при этом максимум имеет место при проценте армирования 1,3;

- уровень прочности не менее 90 % от максимального значения прочности имеет место при любом отношении l/d при коэффициенте армирования $\mu = 1,3$ %;

- повышение предела прочности при сжатии R вследствие дисперсного армирования достигает 16 % в возрасте 2 ч и 19 % в возрасте 28 сут, а при изгибе соответственно на 69 % и 75 % относительно неармированного бетона аналогичного состава.

- исследованные композиты характеризуются весьма высоким темпом твердения, значительно превосходящим и особобыстротвердеющие портландцементные бетоны, и бетоны на основе глиноземистого цемента.

Кинетика нарастания прочности исследованных композитов описывается уравнением:

$$R_{\tau} = R_{28} \exp \left(k \left(1 - \sqrt{\frac{28}{\tau}} \right) \right) \quad (1)$$

при $k = 0,025$, тогда как для особобыстротвердеющих портландцементных бетонов, обеспечивающих в суточном возрасте 50 % проектной прочности, значение $k = 0,16$ [18];

- отношение R_f/R предела прочности при изгибе исследованных композитов с базальтовыми волокнами к пределу прочности при сжатии описывается уравнением:

$$R_f = kR, \quad (2)$$

параметры которого в зависимости от показателей армирования представлены в табл. 2.

В случае полидисперсного армирования зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии независимо от исследуемых факторов описывается уравнением ф. (2) с коэффициентом $k = 0,58$ и показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,98$.

Таблица 2

Параметры уравнения ф. (1)

Отношение l/d	Параметры уравнения ф. (3.8)	
	k	R^2 *
667	0,77	0,99
1444	0,65	0,98
2221	0,73	0,98

Очевидно, что:

- при армировании полипропиленовой фиброй предел прочности при сжатии возрастает незначительно, от 3 до 7 % в зависимости от возраста композита, увеличение предела прочности при изгибе достигает 13 %;

- при армировании базальтовым волокном предел прочности при сжатии возрастает от 1,15 до 1,22 раза в зависимости от возраста композита, увеличение предела прочности при изгибе составляет от 1,61 раза через 2 ч до 1,73 раза через 28 сут;

- при армировании базальтовым волокном в сочетании с полипропиленовой фиброй предел прочности при сжатии возрастает от 1,67

раза через 2 ч до 1,68 раза через 28 сут, увеличение предела прочности при изгибе составляет от 2,17 раза через 2 ч до 2,3 раза через 28 сут;

- параметры полидисперсного армирования не оказывают значительного влияния на зависимость $R_f = f(R)$ исследованных композитов.

Заключение

Рациональными параметрами дисперсного армирования являются для базальтовых волокон соотношение длина/диаметр от 1100 до 1800 при проценте армирования 1,3 по объему, для полидисперсного армирования рациональный процент полипропиленовой фибры 0,42.

Гипсопеплоцементные композиты при соотношении гипс/пепел 1:1 и содержании ПЩ 20% от гипса характеризуются темпом твердения, значительно превосходящим и особобыстротвердеющие портландцементные бетоны, и бетоны на основе глиноземистого цемента.

При армировании базальтовым волокном в сочетании с полипропиленовой фиброй предел прочности при сжатии возрастает от 1,67 раза через 2 ч до 1,68 раза через 28 сут, увеличение предела прочности при изгибе составляет от 2,17 раза через 2 ч до 2,3 раза через 28 сут. Параметры полидисперсного армирования не оказывают значительного влияния на зависимость $R_f = f(R)$ исследованных композитов.

Литература

1. Рахимов Р.З., Халиуллин М.И. Состояние и тенденции развития промышленности гипсовых строительных материалов // Строительные материалы. 2010. № 12. С. 44–46.
2. Юрьев А.Г., Панченко Л.А., Лесовик Р.В. Волокнистые композиты в строительных конструкциях: монография. Белгород: БГТУ, 2006. – 90 с.



3. Моргун Л.В. К вопросу о ресурсосбережении в стройиндустрии и строительстве // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8820.
 4. Хежев Т.А., Кажаров А.Р., Гегиев М.А., Канкулов М.Х., Мукаева З.Б., Токмаков Т.Б., Чеченов Р.С. Огнезащитные гипсовые растворы на вспученном вермикулите с применением вулканического пепла // Инженерный вестник Дона. 2019. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5781.
 5. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1986. 462 с.
 6. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1985. № 8. С. 58–64.
 7. Соломатов В.И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1980. № 8. С. 61–70.
 8. Хежев Т.А., Пухаренко Ю.В., Хашукаев М.Н. Пенобетоны на основе вулканических горных пород // Строительные материалы. 2005. № 12. С. 55–57.
 9. Волков И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 12–13.
 10. Сеница М.С. Исследование влияния армирования на свойства пенобетона // Приложение к журналу «Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века». 2003. № 9. С. 8–9.
 11. Тупицина В.Н. К механизму разрушения бетона и фибробетона при многократном воздействии замораживания // Исследование и расчет экспериментальных конструкций из фибробетона. Л., 1976. С. 102–106.
-

12. Пухаренко Ю.В. Реставрация и строительство: потенциал фиброармированных материалов и изделий // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2012. № 4. URL: science-education.ru/104-6582.
13. Лобанов И.А., Пухаренко Ю.В., Гурашкин Ю.А. Ударостойкость фибробетонов, армированных низкомолекулярными синтетическими волокнами // Технология и долговечность дисперсно-армированных бетонов. Л., 1984. С. 86–93.
14. Моргун В.Н., Моргун Л.В. Свойства пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми и углеродными волокнами // Строительные материалы. 2022. № 9. С. 50-54. DOI 10.31659/0585-430X-2022-806-9-50-54.
15. Беркович Т.М. Структура и прочность дисперсно-армированных волокнистых композиций с цементной матрицей // Материалы нац. конф. «Механика и технология композиционных материалов». София, 1977. С. 782.
16. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. Прочность цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении // Бетон и железобетон. 2013. № 5. С. 6-8.
17. Несветаев Г.В., Налимова А.В. Структурообразование модифицированных смесей на различных вяжущих для наливных полов. Строительство 2005: Материалы межд. конф. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2005, с. 29 - 30.
18. Хежев Т.А., Хежев Х.А. Теплоогнезащитные фиброармированные бетонные композиты с применением вулканических горных пород. Нальчик: Принт Центр, 2022. 340 с.

References

1. Raximov R.Z., Khaliullin M.I. Stroitel`ny`e materialy. 2010. № 12. pp. 44–46.
-



2. Yur`ev A.G., Panchenko L.A., Lesovik R.V. Voloknisty`e kompozity` v stroitel`ny`kh konstrukciyakh: monografiya [Fiber composites in building structures. Belgorod]. BGTU, 2006. 90 p.
 3. Morgun, L.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8820.
 4. Khezhev T.A., Kazharov A.R., M.A. Gegiev, Kankulov M.Kh., Mukaeva Z.B., Tokmakov T.B., Chechenov R.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5781.
 5. Volzhenskij A.V. Mineral`ny`e vyazhushhie veshhestva [Mineral binders]. M. Strojizdat, 1986. 462 p.
 6. Solomatov V.I. Izvestiya vuzov. Stroitel`stvo i arkhitektura. 1985. № 8. pp. 58–64.
 7. Solomatov V.I. Izvestiya vuzov. Stroitel`stvo i arkhitektura. 1980. № 8. pp. 61–70.
 8. Khezhev T.A., Pukharenko Yu.V., Khashukaev M.N. Stroitel`ny`e materialy`. 2005. № 12. pp. 55–57.
 9. Volkov I.V. Stroitel`ny`e materialy`. 2004. № 6. pp. 12–13.
 10. Sinitsa M.S. Prilozhenie k zhurnalu «Stroitel`ny`e materialy`, oborudovanie, tekhnologii XXI veka». 2003. № 9. pp. 8–9.
 11. Tupitsina V.N. Issledovanie i raschet e`ksperimental`ny`x konstrukcij iz fibrobetona. L., 1976. pp. 102–106.
 12. Pukharenko Yu.V. E`lektronny`j nauchny`j zhurnal «Sovremenny`e problemy` nauki i obrazovaniya». 2012. № 4. URL: science-education.ru/104-6582.
 13. Lobanov I.A., Pukharenko Yu.V., Gurashkin Yu.A. Texnologiya i dolgovechnost` dispersno-armirovanny`x betonov. L., 1984. pp. 86–93.
 14. Morgun, V.N., Morgun L.V. Stroitel`ny`e materialy`. 2022. № 9. pp. 50-54. DOI 10.31659/0585-430X-2022-806-9-50-54.
-



15. Berkovich T.M. Materialy` nacz. konf. «Mekhanika i texnologiya kompozitsionnykh materialov». Sofiya, 1977. P. 782.
16. Nesvetaev G. V., Kardumyan G.S. Beton i zhelezobeton. 2013. № 5. pp. 6-8.
17. Nesvetaev G.V., Nalimova A.V. Stroitel`stvo 2005. Materialy mezhd. konf. Rostov-na-Donu. RGSU, 2005. pp. 29 – 30.
- 18 Khezhev T.A., Khezhev Kh.A. Teploognezashchitnyye fibroarmirovannyye betonnyye kompozity s primeneniyyem vulkanicheskikh gornyx porod [Heat-resistant fire-resistant fibre-reinforced concrete composites using volcanic rocks]. Nal`chik. Print Centr, 2022. 340 p.

Дата поступления: 29.12.2024

Дата публикации: 25.02.2025