

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 691.328.32

DOI 10.36622/2541-7592.2024.73.1.001

ПОЛИПРОПИЛЕНОВАЯ ФИБРА КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ПОЛНЫХ УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КЕРАМЗИТОБЕТОНА

В. А. Ржевуцкая¹, Ю. Г. Москалькова²*Белорусско-Российский университет^{1,2}
Республика Беларусь, г. Могилев*

¹ Ст. преп. кафедры промышленного и гражданского строительства, тел.: +375(44)549-11-81,
e-mail: valeriarzhevuckaya@gmail.com

² Канд. техн. наук, доц., доц. кафедры промышленного и гражданского строительства,
тел.: +375(29)742-91-83, e-mail: julia43@tut.by

Постановка задачи. Исследуются особенности развития полных деформаций усадки керамзитобетона, керамзитового фибробетона, керамзитового железобетона и керамзитового фиброжелезобетона. В аналитическом обзоре отмечено, что исследователи констатируют факт снижения усадочных деформаций в результате введения фибры, но не анализируют причины отмеченного явления. В связи с этим цель настоящего исследования — установить причину снижения усадочных деформаций керамзитобетона при добавлении полипропиленовой фибры.

Результаты. Подтверждено, что добавление полипропиленовой фибры снижает деформации полной усадки керамзитобетона на 29—34 % на 120 сут при объемном содержании волокон 0,36 %. Предложены эмпирические зависимости совместности деформаций для керамзитового фибробетона и керамзитового фиброжелезобетона.

Выводы. Экспериментально установлено, фибра является значимым фактором в первые сутки твердения бетонной смеси, когда модуль упругости фибры больше или равен модулю упругости цементного камня: фибровые волокна выступают как связь и влияют на перераспределение усадочных напряжений внутри композита, тем самым позволяя уменьшить значения полных деформаций усадки.

Ключевые слова: усадка, деформации усадки, объемные деформации, легкий бетон, керамзитобетон, фибробетон, полипропиленовая фибра.

Введение. Бетон является комплексным материалом, что обуславливает его упругопластические свойства. Пластические деформации особенно явно проявляются в начальной период твердения бетона и являются следствием процесса усадки. В нормальных сечениях железобетонных элементов в результате усадки в цементном камне возникают растягивающие усилия, а в арматурных стержнях — сжимающие, т. е. к моменту приложения внешней нагрузки железобетонный элемент уже находится в напряженно-деформированном состоянии, обусловленном процессом развития усадки [9, 25, 29].

Согласно исследования [4, 10, 18], значения предельных относительных усадочных деформаций легкого бетона на керамзитовом гравии колеблются в пределах от 0,33 до 0,9 %, а в работе [15] отмечены конечные значения усадки керамзитобетона в пределах от 0,3 до 1 мм

на 1 пог. м. Примечательно, что при одних и тех же составляющих бетонной смеси значения усадочных деформаций могут отличаться в несколько раз [1—3, 12—14, 30]. Широкий диапазон полученных значений усадочных деформаций напрямую зависит от физико-механических характеристик составляющих бетонной смеси, т. е. обусловлен местной сырьевой базой. Таким образом, изучение данного вопроса актуально для каждого конкретного региона.

Исследователями разных стран [6, 11, 16, 21, 22, 28] отмечено, что в результате введения фибрового волокна в керамзитобетонную смесь происходит улучшение физико-механических характеристик керамзитобетона, в том числе снижение усадочных деформаций. Обзор экспериментальных исследований [5, 8, 17, 19, 20, 23, 24], посвященных усадке легких фибробетонов, демонстрирует, что наличие фибры в бетонной смеси позволяет снизить значения относительных деформаций усадки на 10—50 %. При этом исследователи [5, 6, 8, 11, 16, 17, 19—24, 28] не акцентируют внимания на факторе, который оказывает влияние на величину полных деформаций усадки фибробетона и способствует снижению их значений по абсолютной величине.

Нами было сделано предположение, что фибровые волокна в первые сутки твердения бетонной смеси выступают как связь и влияют на перераспределение усадочных напряжений внутри композита. В первые несколько суток значение модуля упругости керамзитобетона невелико и сопоставимо с модулем упругости полипропиленовой фибры. В связи с этим на первоначальном этапе (периоде наиболее интенсивного развития деформаций усадки) в фибровых волокнах по аналогии с арматурными стержнями возникают сжимающие напряжения. Так как внутренние напряжения в композитной системе «керамзитобетон — фибра» и «керамзитобетон — фибра — продольная арматура» являются уравновешенными, то в результате работы полипропиленовых волокон величина растягивающих напряжений в керамзитобетоне снижается, а значит, снижается и величина усадочных деформаций. То есть в период наиболее интенсивного развития усадки (первые сутки после бетонирования) фибровые полипропиленовые волокна становятся внутренней связью, препятствующей свободным деформациям керамзитобетона.

С целью подтверждения данного предположения или его опровержения были проведены экспериментальные исследования развития деформаций усадки в керамзитобетоне, армированном стержневой арматурой, фибровыми волокнами и с комбинированным армированием.

Таким образом, объектом настоящего исследования являлись образцы в виде призм из керамзитобетона, керамзитожелезобетона, керамзитофибробетона и керамзитофиброжелезобетона.

Предмет исследования — полные деформации свободной усадки керамзитобетона и стесненной усадки керамзитофибробетона, керамзитожелезобетона и керамзитофиброжелезобетона.

Цель настоящего исследования — установление причины снижения усадочных деформаций керамзитобетона при добавлении полипропиленовой фибры.

1. Теоретические предпосылки аналитического определения деформаций стесненной усадки дисперсно- и комбинированно-армированного керамзитобетона. В соответствии с общеизвестным уравнением совместности деформаций значение деформаций полной свободной усадки керамзитобетона ε_{lcs} определяется следующим образом:

$$\varepsilon_{lcs} = \varepsilon_{lcs,s} + \varepsilon_{ss}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{lcs,s}$ — относительные деформации усадки керамзитобетона, стесненной арматурными стержнями; ε_{ss} — относительные деформации арматуры.

На основании предположения, что в раннем возрасте низко модульные полипропиленовые волокна выступают в качестве связи, уравнение совместности деформаций для керамзитофибробетона можно представить в следующей интерпретации:

$$\varepsilon_{lcs} = \varepsilon_{lcs,f} + \varepsilon_{fs}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{lcs,f}$ — относительные деформации усадки керамзитобетона, стесненной фиброй; ε_{fs} — относительные деформации фибры.

Поскольку предполагается, что наряду со стержневой арматурой фибровые волокна выступают в качестве внутренних связей и испытывают сжимающие напряжения, то для керамзитовофиброжелезобетона будет справедливо следующее выражение:

$$\varepsilon_{lcs} = \varepsilon_{lcs,f,s} + \varepsilon_{fs} + \varepsilon_{ss,f}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{lcs,f,s}$ — относительные деформации усадки керамзитобетона, стесненной фиброй и арматурными стержнями; ε_{fs} — относительные деформации фибры; $\varepsilon_{ss,f}$ — относительные деформации арматуры.

2. Планирование полного факторного эксперимента типа 2^2 . При проведении экспериментальных исследований реализован план полного факторного эксперимента типа 2^2 (с двумя факторами с варьированием на двух уровнях). В качестве варьируемых переменных были приняты следующие факторы:

- x_1 — наличие дисперсного армирования полипропиленовой фиброй с объемным содержанием 0,36 %, что в предложенном составе керамзитобетонной смеси эквивалентно 1,5 % по массе от массы цемента (6,42 кг на 1 куб. м);
- x_2 — армирование стержневой арматурой при проценте армирования 3,57 % по площади поперечного сечения опытного образца.

В качестве функции отклика (y) служило значение относительной деформации полной усадки бетона на 120 суток. Матрица планирования 2^2 приведена в табл. 1.

Таблица 1

План второго порядка (число факторов $k = 2$)

Номер опыта	Маркировка образцов	План		План в замечаниях	
		x_1	x_2	$x_1, \%$	$x_2, \%$
1	КФЖБ	+1	+1	0,36	3,57
2	КЖБ	–1	+1	0	3,57
3	КФБ	+1	–1	0,36	0
4	КБ	–1	–1	0	0

Примечание: КФЖБ — керамзитовофиброжелезобетон, КЖБ — керамзитожелезобетон, КФБ — керамзитовофибробетон, КБ — керамзитобетон.

3. Основные материалы для приготовления керамзитобетонной и керамзитовофибробетонной смеси. Для приготовления бетонной смеси были использованы следующие материалы:

- керамзитовый гравий производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» по СТБ 1217 (фракция 4—10 мм);
- портландцемент производства ОАО «Белорусский цементный завод» по ГОСТ 30515 и ГОСТ 10178 (активность 42,5 МПа);
- речной песок из карьера «Павловское» Могилевской области (пойма реки Днепр) по ГОСТ 8736 (модуль крупности 2,13);
- вода по СТБ 1114.

Для дисперсного армирования использовалось полипропиленовое волокно производства ООО «Руссеал», изготовленное из гранул высокомолекулярного термопластичного полимера C_3H_6 . При подборе длины фибровых волокон были учтены рекомендации [6], согласно которым предпочтительно использовать длину фибрового волокна, соизмеримую с фракцией

крупного заполнителя (керамзита). В связи с этим в настоящем исследовании в качестве армирующего элемента использовалось волокно строительное микроармирующее длиной 12 мм круглой формы.

Согласно проведенным ранее исследованиям [26, 27], для керамзитобетона процент армирования фиброй 0,36 % по объему бетона является наиболее эффективным из рассмотренных (рассматривалось содержание полипропиленовой фибры 0,12, 0,24 и 0,36 % по объему). На этом основании в настоящем исследовании приняты следующие варианты процентного содержания полипропиленовой фибры: $\rho_{PPf} = 0 \%$; $\rho_{PPf} = 0,36 \%$ по объему керамзитобетона.

При изготовлении опытных образцов, армированных стержневой арматурой, применялись арматурные стержни: диаметром 16 мм класса S500 (продольная арматура, процент продольного стержневого армирования $\rho_s = 3,57 \%$); диаметром 6 мм класса S240 (поперечная арматура).

4. Методика измерения полных деформаций усадки керамзитобетона, керамзитожелезобетона, керамзитобетона и керамзитобетона. В процессе развития усадочных деформаций их фиксирование осуществлялось на образцах в виде призм с размерами 150×150×600 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 24544. Были последовательно испытаны три серии образцов-близнецов (по три образца-близнеца в каждой серии). В табл. 2 представлена характеристика опытных образцов.

Усадочные деформации керамзитобетона на открытой грани опытных призм начинали измеряться не более чем через 3 часа после бетонирования. Для этого база стальных реперов погружалась в бетонную смесь на глубину не менее максимальной крупности заполнителя. Деформации арматуры, возникающие в результате усадки бетона, замерялись на открытой грани призм сразу после бетонирования (подробно методика измерения деформаций стесненной усадки армированного керамзитобетона описана в [7]). Деформации усадки керамзитобетона и деформации арматуры на остальных гранях призм фиксировались сразу после распалубки образцов спустя сутки после бетонирования. Продолжительность снятия показаний составляла 120 сут в соответствии с ГОСТ 24544.

Таблица 2

Основные характеристики опытных образцов и контролируемых параметров

Описание опытных образцов-призм	Маркировка			
	КБ	КФБ	КЖБ	КФЖБ
Характеристика бетонной смеси	$C : П : K = 1 : 1,84 : 0,79$, $B/C = 0,52$	$C : П : K = 1 : 1,84 : 0,79$, $B/C = 0,52$	$C : П : K = 1 : 1,84 : 0,79$, $B/C = 0,52$	$C : П : K = 1 : 1,84 : 0,79$, $B/C = 0,52$
Характеристическое значение цилиндрической прочности f_{1ck} , МПа	13,79	13,79	13,79	13,79
Продольное армирование	—	—	Четыре стержня диаметром 16 мм из арматуры класса S500 ($\rho_s = 3,57 \%$)	Четыре стержня диаметром 16 мм из арматуры класса S500 ($\rho_s = 3,57 \%$)
Дисперсное армирование (полипропиленовая фибра с длиной волокна 12 мм)	—	$\rho_{PPf} = 0,36 \%$ по объему (6,42 кг на 1 куб. м)	—	$\rho_{PPf} = 0,36 \%$ по объему (6,42 кг на 1 куб. м)
Установка индикаторов часового типа (цена деления 1 мкм), база измерения 400 мм	На бетон	На бетон (между фибровыми волокнами)	На бетон (между арматурными стержнями)	На бетон (между арматурными стержнями и фибровыми волокнами)
	—	—	На арматуру	На арматуру

Окончани табл. 2

Описание опытных образцов-призм	Маркировка			
	КБ	КФБ	КЖБ	КФЖБ
Общий вид опытного образца в виде призмы после распалубки с установленными индикаторами часового типа				
Виды относительных деформаций усадки, фиксируемые при проведении эксперимента	Относительные деформации свободной усадки керамзитобетона ϵ_{lcs}	Относительные деформации усадки керамзитобетона, стесненной армированием:		
	—	фибровыми волокнами $\epsilon_{lcs, f}$	арматурными стержнями $\epsilon_{lcs, s}$	арматурными стержнями и фибровыми волокнами $\epsilon_{lcs, f, s}$
	—	—	Относительные деформации арматуры ϵ_{ss}	Относительные деформации арматуры $\epsilon_{ss, f}$

Примечание: Ц — цемент, П — песок, К — керамзитовый гравий, В/Ц — водоцементное отношение.

5. Результаты экспериментальных исследований развития деформаций свободной и стесненной усадки керамзитобетона. В результате проведенных исследований получены экспериментальные данные о развитии в течение 120 сут полных деформаций усадки керамзитобетона, керамзитового фибробетона, керамзитового железобетона и керамзитового фиброжелезобетона. Опытные данные представлены в табл. 3.

На основании опытных данных (табл. 3) можно сделать вывод, что при добавлении полипропиленовой фибры в керамзитобетонную смесь зафиксировано снижение усадочных деформаций в течение 120 сут, что подтверждает сделанное нами предположение: в раннем возрасте низко модульные полипропиленовые волокна выступают в качестве связи. В период набора прочности модуль упругости полипропиленовых фибр выше модуля упругости цементного камня, в результате чего происходит перераспределение напряжений в системе «цементный камень — фибра», что способствует существенному снижению деформаций, обусловленных процессами твердения.

Таблица 3

Средние значения относительных деформаций, вызванных усадкой, для опытных образцов-призм

Краткая характеристика опытных образцов		Условные обозначения относительных деформаций	Средние значения относительных деформаций в момент времени $t, \times 10^5$							
Маркировка	Серия		7 сут	10 сут	14 сут	28 сут	42 сут	62 сут	91 сут	120 сут
КБ	1	ϵ_{lcs}	0,895	3,158	5,976	13,630	19,737	24,332	27,474	28,105
	2		0,782	3,100	5,762	13,661	17,763	23,947	26,842	28,500
	3		0,903	3,272	6,189	13,741	18,221	23,655	28,475	29,450
	Среднее по сериям 1—3		0,860	3,177	5,976	13,677	18,574	23,978	27,597	28,685
КФБ	1	$\epsilon_{lcs, f}$	−0,188	1,534	3,500	9,272	13,084	17,048	19,355	20,022
	2		−0,148	1,441	3,373	9,284	12,869	17,501	19,473	19,899
	3		−0,095	1,639	3,486	9,143	12,379	16,224	18,435	19,350
	Среднее по сериям 1—3		−0,144	1,538	3,453	9,233	12,777	16,924	19,088	19,757

Краткая характеристика опытных образцов		Условные обозначения относительных деформаций	Средние значения относительных деформаций в момент времени $t, \times 10^5$							
Маркировка	Серия		7 сут	10 сут	14 сут	28 сут	42 сут	62 сут	91 сут	120 сут
КЖБ	1	$\varepsilon_{lcs, s}$	0,378	0,952	2,525	5,695	7,557	10,076	12,846	13,854
	2		0,360	0,930	2,540	5,728	8,369	10,512	13,111	14,326
	3		0,384	0,937	2,551	6,388	8,649	11,193	13,414	14,610
	Среднее по сериям 1—3		0,374	0,940	2,539	5,937	8,192	10,593	13,124	14,263
	1	ε_{ss}	0,480	2,293	3,542	7,811	11,032	12,780	15,027	15,934
	2		0,461	2,052	3,539	7,403	10,372	12,727	15,332	15,984
	3		0,479	2,270	3,531	7,240	10,430	12,522	15,017	15,897
	Среднее по сериям 1—3		0,473	2,205	3,537	7,485	10,611	12,676	15,126	15,938
КФЖБ	1	$\varepsilon_{lcs, f, s}$	−0,186	0,708	2,322	5,355	6,950	8,289	10,106	11,603
	2		−0,198	0,879	2,308	5,395	7,394	8,798	10,715	12,194
	3		−0,330	0,814	2,281	5,252	6,996	9,289	10,532	10,801
	Среднее по сериям 1—3		−0,238	0,800	2,304	5,334	7,113	8,792	10,451	11,533
	1	$\varepsilon_{ss, f}$	0,096	0,756	1,522	3,834	5,869	7,141	8,923	10,061
	2		0,064	0,666	1,566	3,778	6,110	7,501	9,399	10,015
	3		0,197	0,796	1,384	4,348	6,097	7,705	9,556	10,108
	Среднее по сериям 1—3		0,119	0,739	1,491	3,987	6,025	7,449	9,292	10,061

Соответственно, за счет снижения деформаций в раннем периоде наблюдается уменьшение полных деформаций усадки в последующие сутки: на 120 сутки зафиксировано снижение величины относительных деформаций полной усадки керамзитобетона примерно на 30 % по сравнению с керамзитобетоном без дисперсного армирования (на 28,76 % для серии № 1, на 30,18 % для серии № 2 и на 34,30 % для серии № 3). Значения относительных деформаций полной усадки опытных образцов на 120 сут приведены в табл. 4 (на основании данных табл. 3).

Таблица 4
Значения относительных деформаций полной усадки бетона

Номер опыта	Маркировка образцов	Условное обозначение относительных деформаций	Значения параллельных измерений функций отклика $y, \times 10^5$ на 120 сут			Среднее значение $\bar{y}, \times 10^5$	Дисперсия $S_j^2 \times 10^{10}$
			Серия № 1	Серия № 2	Серия № 3		
1	КФЖБ	$\varepsilon_{lcs, f, s}$	11,60	12,19	10,80	11,53	0,489
2	КЖБ	$\varepsilon_{lcs, s}$	13,85	14,33	14,61	14,26	0,146
3	КФБ	$\varepsilon_{lcs, f}$	20,02	19,90	19,35	19,76	0,128
4	КБ	$\varepsilon_{lc, cs}$	28,10	28,50	29,45	28,68	0,478
Σ						74,24	1,241

Расчетное значение критерия Кохрена:

$$G = \frac{S_{j, \max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} = \frac{0,489 \cdot 10^{-10}}{1,241 \cdot 10^{-10}} = 0,394.$$

Критическое значение критерия Кохрена $G_{crit} = G_{0,05;3;3} = 0,798$ (при уровне значимости $\alpha = 0,05$; числе степеней свободы $f = 3$).

Условие $G \leq G_{crit}$ выполняется, следовательно, опыты воспроизводимы.

Оценка однородности дисперсии:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N S_j^2 = \frac{1}{4} \cdot 1,241 \cdot 10^{-10} = 0,310 \cdot 10^{-10},$$

при размере выборки $N = 4$.

Оценка дисперсии среднего значения:

$$S_y^2 = \frac{S_y^2}{K} = \frac{0,310 \cdot 10^{-10}}{3} = 0,103 \cdot 10^{-10},$$

при числе параллельных опытов $K = 3$.

Для установления значимости коэффициентов регрессии вычислялась ошибка в их оценке:

$$S_b = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}} = \sqrt{\frac{0,103 \cdot 10^{-10}}{4}} = 0,161 \cdot 10^{-5}.$$

При числе степеней свободы $f = N \cdot (K - 1) = 4 \cdot (3 - 1) = 8$. Значение критерия Стьюдента $t = 1,860$. Тогда $S_b \cdot t = 0,161 \cdot 10^{-5} \cdot 1,860 = 0,299 \cdot 10^{-5}$.

Расчет коэффициентов уравнения регрессии приведен в табл. 5 (на основании данных табл. 1). Значения коэффициентов регрессии приведены в табл. 6.

Таблица 5

Расчет коэффициентов уравнения регрессии

Номер опыта	Маркировка образцов	$x_1, \times 10^5$	$x_2, \times 10^5$	$x_1 \cdot x_2, \times 10^5$	Среднее значение $\overline{y}, \times 10^5$
1	КФЖБ	11,53	11,53	11,53	11,53
2	КЖБ	-14,26	14,26	-14,26	14,26
3	КФБ	19,76	-19,76	-19,76	19,76
4	КБ	-28,68	-28,68	28,68	28,68
Σ		-11,66	-22,65	6,20	74,24

Таблица 6

Значение коэффициентов регрессии

$b_0, \times 10^5$	$b_1, \times 10^5$	$b_2, \times 10^5$	$b_{12}, \times 10^5$
18,6	-2,9	-5,7	1,6

Поскольку значения коэффициентов регрессии не менее $S_b \cdot t = 0,299 \cdot 10^{-5}$, констатируем, что все коэффициенты регрессии значимы.

Уравнение регрессии в кодированных переменных имеет вид:

$$y = 18,6 \cdot 10^{-5} - 2,9 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 - 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot x_2 + 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_2.$$

Проверка адекватности уравнения осуществлялась при помощи критерия Фишера следующим образом:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N - B} \cdot \sum_{j=1}^N (y_j^{опытн} - y_j^{теор})^2 = \frac{1}{4 - 3} \cdot 0,024 \cdot 10^{-10} = 0,008 \cdot 10^{-10},$$

где B — число значимых коэффициентов регрессии уравнения ($B = 3$); $y_j^{опытн}$ — опытное значение функции отклика; $y_j^{теор}$ — теоретическое значение функции отклика.

Расчет эмпирических и расчетных значений функции отклика представлен в табл. 7.

Таблица 7

Проверка пригодности уравнения регрессии

Номер опыта	Маркировка образцов	Полученные результаты		Разность, $(y_j^{опытн} - y_j^{теор}), \times 10^5$	Квадрат разности, $(y_j^{опытн} - y_j^{теор})^2, \times 10^{10}$
		Опытные, $y_j^{опытн}, \times 10^5$	Расчетные, $y_j^{теор}, \times 10^5$		
1	КФЖБ	11,53	11,60	-0,067	0,005
2	КЖБ	14,26	14,20	0,063	0,004
3	КФБ	19,76	19,80	-0,043	0,002
4	КБ	28,68	28,80	-0,115	0,013
Σ					0,024

В соответствии с полученными результатами уравнение регрессии в кодированных переменных адекватно описывает экспериментальные данные, поскольку расчетное значение критерия Фишера не превосходит его критического значения:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,008 \cdot 10^{-10}}{0,103 \cdot 10^{-10}} = 0,076 < F_{0,05;3;8} = 4,066.$$

Наиболее сильное влияние на функцию отклика оказывает фактор x_2 — процент армирования стержневой арматурой (он имеет коэффициент, наибольший по абсолютной величине); вторым по силе влияния на отклик является фактор x_1 — процент дисперсного армирования полипропиленовой фиброй; значимое влияние оказывает также парное взаимодействие $x_1 \cdot x_2$, т. е. процентное содержание стержневого и дисперсного видов армирования.

На основании этого можно сделать следующие выводы: опыты воспроизводимы, полученное уравнение регрессии адекватно описывает экспериментальные данные, все коэффициенты уравнения регрессии значимы.

Таким образом, подтверждается сделанное ранее предположение, что фибровые волокна работают как связь в раннем возрасте керамзитового бетона и снижают усадочные деформации аналогично стержневому армированию.

6. Верификация предложенного способа аналитического определения деформаций стесненной усадки дисперсно- и комбинированно-армированного керамзитобетонного элемента по опытным данным. Проверим опытным путем предположение, что полипропиленовая фибра выступает в качестве связи, в результате чего способствует снижению полных деформаций усадки керамзитобетона. Экспериментальные значения относительных деформаций, возникающих в фибровых полипропиленовых волокнах, определены на основании данных табл. 3.

Установлено, что деформации усадки керамзитожелезобетона, зафиксированные на бетоне, оказались больше значений деформаций усадки керамзитового бетона, замеренных на бетоне: $\varepsilon_{lcs, s} > \varepsilon_{lcs, f, s}$.

Аналогично для деформаций, зафиксированных на арматуре: $\varepsilon_{ss} > \varepsilon_{ss, f}$.

Отмеченное изменение величины деформаций можно объяснить только влиянием фибровых волокон на напряженно-деформированное состояние элемента, поскольку другие влияющие факторы были исключены.

Результаты верификации по опытным данным приведены в табл. 8.

На основании результатов, приведенных в табл. 8, очевидно, что значения относительных деформаций фибры $\varepsilon_{fs}^{КФБ}$ оказались примерно равными $\varepsilon_{fs}^{КФЖБ}$, а величина отклонения составила не более 11 %, что позволяет считать справедливым равенство $\varepsilon_{fs}^{КФБ} = \varepsilon_{fs}^{КФЖБ}$.

Таблица 8

Опытные значения
относительных деформаций полипропиленовой фибры в результате усадки

Возраст, сут	Относительные деформации в фибре, $\times 10^5$, рассчитанные по опытным данным по приведенной формуле				Отклонение $\frac{\varepsilon_{fs}^{КФБ} - \varepsilon_{fs}^{КФЖБ}}{\varepsilon_{fs}^{КФЖБ}} \cdot 100 \%$
	для КФБ	для КФЖБ			
	$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{lcs} - \varepsilon_{lcs,f}$	$\Delta\varepsilon_{lcs,f,s} = \varepsilon_{lcs,s} - \varepsilon_{lcs,f,s}$	$\Delta\varepsilon_{ss,f} = \varepsilon_{ss} - \varepsilon_{ss,f}$	$\varepsilon_{fs} = \Delta\varepsilon_{lcs,f,s} + \Delta\varepsilon_{ss,f}$	
7	1,004	0,612	0,354	0,967	3,86 %
10	1,639	0,139	1,465	1,605	2,11 %
14	2,523	0,235	2,046	2,281	10,57 %
28	4,445	0,603	3,498	4,101	8,37 %
42	5,796	1,078	4,586	5,664	2,33 %
62	7,054	1,801	5,227	7,029	0,36 %
91	8,509	2,673	5,833	8,506	0,03 %
120	8,928	2,731	5,877	8,608	3,72 %

Примечание: $\Delta\varepsilon_{lcs,f,s}$ — относительные деформации фибры, полученные как разность относительных деформаций усадки керамзитобетона, стесненной фибровыми волокнами и арматурными стержнями, и относительных деформаций арматуры; $\Delta\varepsilon_{ss,f}$ — относительные деформации фибры, полученные как разность относительных деформаций усадки керамзитобетона, стесненной арматурными стержнями, и относительных деформаций арматуры.

Деформации фибровых волокон в образце с дисперсным армированием $\varepsilon_{fs}^{КФБ}$ сопоставимы по абсолютной величине с деформациями фибровых волокон в образцах с комбинированным армированием $\varepsilon_{fs}^{КФЖБ}$, т. е. независимо от типа армирования при одинаковом содержании фибровых волокон в них возникают приблизительно равные деформации сжатия, вызванные усадкой цементного камня, а значит, близкие по величине сжимающие напряжения.

Таким образом, эмпирически доказано, что полипропиленовая фибра работает как связь, способствуя снижению деформаций усадки керамзитобетона в раннем возрасте, когда модуль упругости фибры больше или равен модулю упругости цементного камня.

Выводы

1. Экспериментально подтверждено, что в раннем возрасте низко модульные полипропиленовые волокна выступают в качестве связи. В период набора прочности керамзитобетона модуль упругости полипропиленовой фибры выше модуля упругости цементного камня, в результате чего происходит перераспределение напряжений в системе «цементный камень — фибра», что способствует существенному снижению деформаций, обусловленных процессами твердения.

2. Предложены уравнения совместности деформаций для керамзитового бетона (керамзитобетон, армированный полипропиленовой фиброй) и керамзитового железобетона (керамзитобетон с комбинированным армированием — стержневая арматура и фибровые волокна) с последующей верификацией по опытным данным.

3. Эмпирически установлено, что при проценте дисперсного армирования 0,36 % по объему наличие полипропиленовой фибры в керамзитобетонной смеси позволяет снизить деформации полной усадки примерно на 30 % на 120 сут в естественных условиях твердения по сравнению с керамзитобетоном без дисперсного армирования.

4. Перспективным представляется изучение кинетики изменения модуля упругости керамзитового бетона во времени, особенно в раннем возрасте (3—7 сут). На основании значения модуля упругости керамзитового бетона представляется возможным разработать алгоритм определения полных деформаций усадки в любой момент времени $t < 120$ сут.

Библиографический список

1. **Ахвердов, И. Н.** Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. — М.: Стройиздат, 1981. — 464 с.
2. **Довжик, В. Г.** Технология высокопрочного бетона / В. Г. Довжик, В. А. Дорф, В. П. Петров. — М.: Стройиздат, 1976. — 136 с.
3. **Каримов, И. Ш.** Механизм усадочных деформаций бетона и факторы, влияющие на них (обзор). Ч. 1 / И. Ш. Каримов // Технологии бетонов. — 2010. — № 5—6. — С. 22—24.
4. **Кравченко, С. А.** Исследование свойств конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов на пористых заполнителях / С. А. Кравченко, А. А. Постернак // Актуальные научные исследования в современном мире. — 2017. — № 12 (32). — С. 129—135.
5. **Курятников, Ю. Ю.** Разработка математических моделей физико-механических свойств модифицированного керамзитобетона / Ю. Ю. Курятников, Р. С. Кочетков // Инновации и моделирование в строительном материаловедении: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Тверь, 19—20 февраля 2019 г. — Тверь, 2019. — С. 64—69.
6. Применение фибробетона в железобетонных конструкциях / И. В. Белоусов [и др.] // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 4. — С. 1—16.
7. **Семенюк, С. Д.** Особенности определения стесненной усадки керамзитожелезобетона / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Москалькова, В. А. Ржевущая // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. — 2020. — № 8. — С. 58—65.
8. **Суворов, И. О.** Дисперсное полиармирование как способ снижения усадки фибропенобетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Иван Олегович Суворов. — СПб., 2015. — 137 с.
9. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели / Д. Н. Лазовский [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. — 2021. — № 2 (125). — С. 7—12. — <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2021-125-2-7-12>.
10. **Штерн, В. О.** Конструктивные свойства керамзитозолобетона и особенности работы изгибаемых элементов из него: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Владислав Оскарович Штерн. — Челябинск, 1990. — 17 с.
11. **Altalabani, D.** Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete / D. Altalabani, D. K. H. Bzeni, St. Linsel // Construction and Building Materials. — 2020. — Vol. 252. — P. 119084. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119084>.
12. **Bazant, Z. P.** Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future / Z. P. Bazant // Nuclear Engineering and Design. — 2001. — Vol. 203, Iss. 1. — P. 27—38. — [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(00\)00299-5](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(00)00299-5).
13. **Bogas, J. A.** Influence of mineral additions and different compositional parameters on the shrinkage of structural expanded clay lightweight concrete / J. A. Bogas, R. Nogueira, N. G. Almeida // Materials & Design. — 2014. — Vol. 56, Iss. 4. — P. 1039—1048. — <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.013>.
14. **Bremner, T. W.** Lightweight concrete / T. W. Bremner // Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete. — 2008. — P. 307—323.
15. **Clarke, J. L.** Structural lightweight aggregate concrete / J. L. Clarke. — Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, an Imprint of Chapman & Hall, 2005. — 161 p.
16. Comparison of flexural property between high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete / J. J. Li [et al.] // Construction and Building Materials. — 2017. — Vol. 322. — P. 729—736. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.149>.
17. **Costa, H.** New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete / H. Costa, E. Júlio, J. Lourenço // Constructions and Buildings materials. — 2012. — Vol. 35. — P. 84—91. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.052>.
18. Drying shrinkage properties of expanded polystyrene (EPS) lightweight aggregate concrete: A review / M. Maghfouri // Case Studies in Construction Materials. — 2017. — Vol. 16. — P. e00919. — <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00919>.
19. Effect of clay content on shrinkage of cementitious materials / H. Zhao [et al.] // Construction and Building Materials. — 2022. — Vol. 157. — P. 125959. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125959>.
20. Experimental study on autogenous and drying shrinkage of steel fiber reinforced lightweight-aggregate concrete / S. Zhao [et al.] // Advances in Materials Science and Engineering. — 2016. — Vol. 2016. — P. 9. — <https://doi.org/10.1155/2016/2589383>.
21. **Fallah, S.** Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume / S. Fallah, M. Nematzadeh // Construction and Building Materials. — 2017. — Vol. 132. — P. 170—187. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100>.

22. **Fantilli, A. P.** Ecological and mechanical assessment of lightweight fiber-reinforced concrete made with rubber or expanded clay aggregates / A. P. Fantilli, B. Chiaia, A. Gorino // *Construction and Building Materials*. — 2016. — Vol. 127. — P. 692–701. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.020>.
23. **Gong, J.** Influence of shrinkage-reducing agent and polypropylene fiber on shrinkage of ceramsite concrete / J. Gong, W. Zeng, W. Zhang // *Construction and Building Materials*. — 2018. — Vol. 159. — P. 155–163. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.064>.
24. **Hussein, Z. M.** Shrinkage and impact strength of fibre-reinforced artificial lightweight aggregate concrete / Z. M. Hussein, W. I. Khalil, H. K. Ahmed // *Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 671, Iss. 1. — P. 1–11.
25. **Lobacheva, N.** Comparative analysis of calculations of strip foundation, taking into account the influence of adjoined building with different soil models / N. Lobacheva, V. Griniov // *XXII International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering Construction the Formation of Living Environment*. — 2019. — Vol. 97. — P. 9. — <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704006>.
26. **Maskalkova, Y. G.** The effective reinforcement ratio of expanded clay concrete by polypropylene fiber / Y. G. Maskalkova, V. A. Rzhevutskaya // *Construction of Unique Buildings and Structures*. — 2020. — Vol. 93, Iss. 8. — P. 11. — <https://doi.org/10.18720/CUBS.93.3>.
27. **Maskalkova, Y. G.** Compressive cylinder strength and deformability of expanded clay fiber-reinforced concrete with polypropylene fiber / Y. G. Maskalkova, V. A. Rzhevutskaya // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. — 2022. — Vol. 18, Iss. 2. — P. 31–42. — <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-31-42>.
28. Shrinkage mechanisms and shrinkage-mitigating strategies of alkali-activated slag composites: A critical review / B. Zhang // *Constructions and Buildings materials*. — 2022. — Vol. 318. — P. 125993. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125993>.
29. **Zhang, J.** Calculation of shrinkage stress in concrete structures with impact of internal curing / J. Zhang, J. Wang, X. Ding // *Engineering Fracture Mechanics*. — 2018. — Vol. 192. — P. 54–76. — <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.002>.
30. **Zhang, X.** Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete / X. Zhang, Z. Liu, F. Wang // *Constructions and Buildings materials*. — 2019. — Vol. 226. — P. 459–468. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.177>.

References

1. **Ahverdov, I. N.** *Osnovy fiziki betona* / I. N. Ahverdov. — M.: Strojizdat, 1981. — 464 s.
2. **Dovzhik, V. G.** *Tehnologija vysokoprochnogo betona* / V. G. Dovzhik, V. A. Dorf, V. P. Petrov. — M.: Strojizdat, 1976. — 136 s.
3. **Karimov, I. Sh.** *Mehanizm usadochnykh deformacij betona i faktory, vlijajushhie na nih (obzor)*. Chast' 1 / I. Sh. Karimov // *Tehnologii betonov*. — 2010. — № 5–6. — S. 22–24.
4. **Kravchenko, S. A.** *Issledovanie svojstv konstrukcionno-teploizoljacionnykh legkikh betonov na poristyh zapolniteljah* / S. A. Kravchenko, A. A. Posternak // *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. — 2017. — № 12 (32). — S. 129–135.
5. **Kurjatnikov, Ju. Ju.** *Razrabotka matematicheskikh modelej fiziko-mehanicheskikh svojstv modifitsirovannogo keramzitobetona* / Ju. Ju. Kurjatnikov, R. S. Kochetkov // *Innovacii i modelirovanie v stroitel'nom materialovedenii: materialy IV Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., Tver', 19–20 fevralja 2019 g.* — Tver', 2019. — S. 64–69.
6. *Primenenie fibrobetona v zhelezobetonnykh konstrukcijah* / I. V. Belousov [i dr.] // *Inzhenernyj vestnik Dona*. — 2017. — № 4. — S. 1–16.
7. **Semenjuk, S. D.** *Osobennosti opredelenija stesnennoj usadki keramzitozhelezobetona* / S. D. Semenjuk, Ju. G. Moskal'kova, V. A. Rzhevuckaja // *Vestnik Polockogo gos. un-ta. Serija F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. — 2020. — № 8. — S. 58–65.
8. **Suvorov, I. O.** *Dispersnoe poliamirovanie kak sposob snizhenija usadki fibropenobetona: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.05* / Ivan Olegovich Suvorov. — SPb., 2015. — 137 s.
9. *Uchet polzuchesti i usadki betona po SP 5.03.01-2020 pri raschete zhelezobetonnykh konstrukcij na osnove deformacionnoj raschetnoj modeli* / D. N. Lazovskij [i dr.] // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. — 2021. — № 2 (125). — S. 7–12. — <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2021-125-2-7-12>.
10. **Shtern, V. O.** *Konstruktivnye svojstva keramzitozolobetona i osobennosti raboty izgibaemykh jelementov iz nego: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.01* / Vladislav Oskarovich Shtern. — Cheljabinsk, 1990. — 17 s.

11. **Altalabani, D.** Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete / D. Altalabani, D. K. H. Bzeni, St. Linsel // *Construction and Building Materials*. — 2020. — Vol. 252. — P. 119084. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119084>.
12. **Bazant, Z. P.** Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future / Z. P. Bazant // *Nuclear Engineering and Design*. — 2001. — Vol. 203, Iss. 1. — P. 27—38. — [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(00\)00299-5](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(00)00299-5).
13. **Bogas, J. A.** Influence of mineral additions and different compositional parameters on the shrinkage of structural expanded clay lightweight concrete / J. A. Bogas, R. Nogueira, N. G. Almeida // *Materials & Design*. — 2014. — Vol. 56, Iss. 4. — P. 1039—1048. — <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.013>.
14. **Bremner, T. W.** Lightweight concrete / T. W. Bremner // *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*. — 2008. — P. 307—323.
15. **Clarke, J. L.** Structural lightweight aggregate concrete / J. L. Clarke. — Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, an Imprint of Chapman & Hall, 2005. — 161 p.
16. Comparison of flexural property between high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete / J. J. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2017. — Vol. 322. — P. 729—736. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.149>.
17. **Costa, H.** New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete / H. Costa, E. Júlio, J. Lourenço // *Constructions and Buildings materials*. — 2012. — Vol. 35. — P. 84—91. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.052>.
18. Drying shrinkage properties of expanded polystyrene (EPS) lightweight aggregate concrete: A review / M. Maghfouri // *Case Studies in Construction Materials*. — 2017. — Vol. 16. — P. e00919. — <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022. e00919>.
19. Effect of clay content on shrinkage of cementitious materials / H. Zhao [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2022. — Vol. 157. — P. 125959. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125959>.
20. Experimental study on autogenous and drying shrinkage of steel fiber reinforced lightweight-aggregate concrete / S. Zhao [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. — 2016. — Vol. 2016. — P. 9. — <https://doi.org/10.1155/2016/2589383>.
21. **Fallah, S.** Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume / S. Fallah, M. Nematzadeh // *Construction and Building Materials*. — 2017. — Vol. 132. — P. 170—187. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100>.
22. **Fantilli, A. P.** Ecological and mechanical assessment of lightweight fiber-reinforced concrete made with rubber or expanded clay aggregates / A. P. Fantilli, B. Chiaia, A. Gorino // *Construction and Building Materials*. — 2016. — Vol. 127. — P. 692—701. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.020>.
23. **Gong, J.** Influence of shrinkage-reducing agent and polypropylene fiber on shrinkage of ceramsite concrete / J. Gong, W. Zeng, W. Zhang // *Construction and Building Materials*. — 2018. — Vol. 159. — P. 155—163. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.064>.
24. **Hussein, Z. M.** Shrinkage and impact strength of fibre-reinforced artificial lightweight aggregate concrete / Z. M. Hussein, W. I. Khalil, H. K. Ahmed // *Materials Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 671, Iss. 1. — P. 1—11.
25. **Lobacheva, N.** Comparative analysis of calculations of strip foundation, taking into account the influence of adjoined building with different soil models / N. Lobacheva, V. Griniov // *XXII International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering Construction the Formation of Living Environment*. — 2019. — Vol. 97. — P. 9. — <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704006>.
26. **Maskalkova, Y. G.** The effective reinforcement ratio of expanded clay concrete by polypropylene fiber / Y. G. Maskalkova, V. A. Rzhevutskaya // *Construction of Unique Buildings and Structures*. — 2020. — Vol. 93, Iss. 8. — P. 11. — <https://doi.org/10.18720/CUBS.93.3>.
27. **Maskalkova, Y. G.** Compressive cylinder strength and deformability of expanded clay fiber-reinforced concrete with polypropylene fiber / Y. G. Maskalkova, V. A. Rzhevutskaya // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. — 2022. — Vol. 18, Iss. 2. — P. 31—42. — <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-31-42>.
28. Shrinkage mechanisms and shrinkage-mitigating strategies of alkali-activated slag composites: A critical review / B. Zhang // *Constructions and Buildings materials*. — 2022. — Vol. 318. — P. 125993. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125993>.
29. **Zhang, J.** Calculation of shrinkage stress in concrete structures with impact of internal curing / J. Zhang, J. Wang, X. Ding // *Engineering Fracture Mechanics*. — 2018. — Vol. 192. — P. 54—76. — <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.002>.
30. **Zhang, X.** Autogenous shrinkage behavior of ultra-high performance concrete / X. Zhang, Z. Liu, F. Wang // *Constructions and Buildings materials*. — 2019. — Vol. 226. — P. 459—468. — <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.177>.

POLYPROPYLENE FIBER AS A FACTOR OF REDUCTION OF THE TOTAL SHRINKAGE STRAIN OF EXPANDED CLAY CONCRETE

V. A. Rzhevutskaya¹, Yu. G. Moskal'kova²

*Belarusian-Russian University^{1,2}
Republic of Belarus, Mogilev*

¹ Senior Lecturer of the Dept. of Industrial and Civil Construction, tel.: +375(44)549-11-81,
e-mail: valeriarzhevuckaya@gmail.com

² PhD in Engineering, Assoc. Prof. of the Dept. of Industrial and Civil Construction, tel.: +375(29)742-91-83,
e-mail: julia43@tut.by

Statement of the problem. The article presents the development features of the total shrinkage strain of expanded clay concrete, expanded clay fiber-reinforced concrete, expanded clay steel-reinforced concrete, and expanded clay fiber-steel-reinforced concrete. According to the analytical review, the shrinkage strain decrease as a result of the fibers adding was noted by the researchers without analyzing the reason for the phenomenon. Therefore the purpose of the study is to establish the reason for the decrease of the shrinkage strain of expanded clay concrete with the addition of polypropylene fibers.

Results. It has been confirmed that the polypropylene fiber addition reduces the total shrinkage strain of expanded clay concrete by 29—34 % on the 120th day with the volume content of fibers of 0.36 %. Empirical dependences of deformations compatibility for expanded clay fiber-reinforced concrete and expanded clay fiber-steel-reinforced concrete are set forth.

Conclusions. It has been experimentally established that fiber is a significant factor on the first days of the concrete mixture hardening, when the elastic modulus of the fiber is greater than or equal to the elastic modulus of the cement stone. Fibers act as a bond and affect the redistribution of shrinkage stresses within the composite, thus reducing the values of the total shrinkage strain.

Keywords: shrinkage, shrinkage strain, volumetric deformations, lightweight concrete, expanded clay concrete, fiber-reinforced concrete, polypropylene fiber.