

ДИСПЕРСНОЕ АРМИРОВАНИЕ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА КАК ФАКТОР УЛУЧШЕНИЯ ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

DISPERSED REINFORCEMENT OF CELLULAR CONCRETE AS A FACTOR OF IMPROVEMENT OF ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

В. Н. СТРОЦКИЙ, канд. техн. наук
А. М. КРОХИН, канд. техн. наук
В. И. САВИН, канд. техн. наук
С. Г. ЗИМИН

Выполнен обзор и анализ фундаментальных научных работ в части проблематики повышения трещиностойкости ячеистого бетона. Рассмотрены актуальные вопросы исследований применения в ячеистом бетоне дисперсного армирования минеральной и полимерной фиброй. Установлена эффективность фибрового армирования автоклавного фиброгазобетона и неавтоклавного фибропенобетона. Приведены опытные данные, полученные в результате исследований прочностных и деформационных характеристик, а также трещиностойкости ячеистого фибробетона, подтверждающие более высокие прочностные и деформационные качества ячеистого бетона с дисперсным армированием по сравнению с неармированным ячеистым бетоном, а также свидетельствующие о положительном влиянии дисперсного армирования на трещиностойкость и на повышение сопро-

The review and analysis of fundamental scientific works in the part of problems of increase of crack resistance of cellular concrete is carried out. The topical issues of application in cellular concrete of dispersed reinforcement with mineral and polymer fiber are considered. The efficiency of fiber reinforcement of autoclaved fiber-gas concrete and non-autoclaved fiber-foam concrete is established.

The experimental data obtained as a result of studies of strength and deformation characteristics, as well as crack resistance of cellular fiber concrete, which confirmed the higher strength and deformation qualities of cellular concrete with dispersed reinforcement in comparison with non-reinforced cellular concrete, as well as evidence of the positive effect of dispersed reinforcement on crack resistance and on increasing the resistance to brittle fracture. The experimental

тивления хрупкому разрушению. Показаны опытные составы автоклавного ячеистого бетона (фиброгазобетона) и неавтоклавного (фибропенобетона) с прочностными и деформационными характеристиками. Даны предложения по проектированию и расчету конструкций из ячеистого фибробетона, в частности, по нормированию прочностных характеристик (нормативного остаточного сопротивления при растяжении).

Ключевые слова:

Асбестовое волокно, базальтовая фибра, ячеистый фибробетон, дисперсное армирование, полипропиленовая фибра, фиброгазобетон фибропенобетон хризотил-асбестовая фибра

compositions of autoclaved cellular concrete (fiber-gas concrete) and non-autoclaved (fiber-foam concrete) with strength and deformation characteristics are presented.

The proposals for the design and calculation of structures from cellular concrete, in particular on the valuation of the strength characteristics (normative residual resistance tensile) are given.

Key words:

Asbestos fiber, basalt fiber, cellular fiber concrete, chrysotile-asbestos fiber, dispersed reinforcement, fibrogasobeton, fibropenobeton, polypropylene fiber

Дисперсное армирование как фактор макроструктурных изменений ячеистого бетона, повышения его трещиностойкости и прочности при растяжении

Повышению прочности на растяжение конструкционных материалов были посвящены в свое время фундаментальные научные работы таких советских ученых как А.Ф. Иоффе, А.П. Александрова, С.Н. Журкова, а также зарубежных исследователей А.А. Гриффитса, Е.О. Орована, Дж.Р. Ирвина [28, 32, 29, 31, 30]. Этими исследователями было положено начало новому направлению в науке о прочности материалов – механике разрушения.

Было установлено, что повышение прочности при растяжении может быть достигнуто не только путем создания бездефектных материалов, но и за счет торможения развития уже появившихся в теле материала трещин.

Указанное направление получило значительное развитие в исследованиях Ю.Н. Работнова, В.В. Панасюка, В.М. Финкеля, Г.П. Черепанова, В.З. Партона, В.В. Болотина, Г.М. Бартнева, а также Дж. Гордона, Г. Либовица, А. Келли, К.Т. Кортена, Б.У. Розена и других ученых. Основы теории разрушения бетонов рассмотрены в работах Ю.М. Боженова, Г.И. Горчакова, А.Ф. Полака, Ю.В. Зайцева [4, 5], К.А. Пирадова [14], Е.А. Гузеева [15], Н.И. Карпенко [6].

Общим для указанных выше работ является признание определяющего влияния структуры материала на процесс его разрушения. Торможение развитию трещин в материале предлагается осуществлять за счет направленного формирования его структуры, в частности, создания специальных структурных «барьеров». В качестве последних могут выступать, в том числе, армирующий волокнистый высокопрочный компонент. К основным условиям создания композитов и эффективности дисперсного армирования Ван Флек [26] относит превышение модуля упругости упрочняющего компонента по сравнению с модулем упругости матрицы.

Одним из мероприятий, позволяющим в определенной степени решить проблему повышения прочности при растяжении, является армирование ячеистого бетона волокнистым компонентом, обладающим более высокой прочностью и более высоким модулем упругости. Волокна, распределенные в материале, воспринимают часть напряжений матрицы и смещают момент начала трещинообразования в область более высоких напряжений, а также способствуют торможению развивающихся трещин. Если трещина пересекает на своем пути волокна, концы которых защемлены бетоном, то растягивающие напряжения, возникающие в устье трещины от действия нагрузки, уравниваются напряжениями, появляющимися на участках, прилегающих к концам волокон.

Разновидности стекловолокна, разработанные в свое время в Государственном институте стекла, были использованы в исследованиях Х.С. Воробьевым и В.Г. Бортниковым [3] для дисперсного армирования ячеистого бетона. Авторами были получены положительные результаты, свидетельствующие о повышении прочностных характеристик ячеистого бетона. Было установлено, что введение в ячеистобетонную смесь 1-10% цементно-стойкого стекловолокна позволяет повысить прочность ячеистого бетона на растяжение при изгибе на 20-200%, при сжатии – на 36-60%, а также увеличить ударную прочность на 150-400%.

Основы автоклавного способа производства асбестоцементных изделий были разработаны Т.М. Берковичем [2]. При изготовлении автоклавных асбестоцементных изделий автор предложил применять не только традиционный цемент, но и известково-песчаное вяжущее. По Т.М. Берковичу, повышение прочностных показателей материала обеспечивается, с одной стороны, в результате усиления армирующего эффекта асбестового волокна, а с другой, за счет интенсифицирующего влияния асбеста на процесс гидратации цемента и усвоения зерен кварцевого песка.

А.В. Лобастовым [9] была изучена возможность повышения физико-механических свойств теплоизоляционного газобетона за счет введения в ячеистобетонную смесь отходов обогащения хризотил-асбеста. Асбестовый компонент в данном случае рассматривался в качестве заполнителя и вводился путем замещения части кремнеземистого компонента (песка) (от 10 до 80%). Установлено, что замена 40% молотого песка хризотил-асбестом позволило повысить предел прочности при изгибе теплоизоляционного газобетона в 2,2-2,5 раза, а предел прочности при сжатии — на 20%. Замещение же песка асбестовым компонентом в количестве 60% и более приводит уже к снижению прочностных показателей.

В.В. Макарычев [11] в начале 80-х годов отмечал, что если в тяжелом бетоне фибровое армирование целесообразно только в необходимых случаях, то в ячеистом бетоне вследствие его низкой прочности на растяжение оно целесообразно всегда, т. е. во всех изделиях.

Для широкого применения фибрового армирования в ячеистом бетоне В.В. Макарычевым было предложено решить следующий комплекс вопросов:

- сохранность (стойкость и долговечность) каждого вида материала фибр в цементных, известковых, зольных и других растворах с различной степенью щелочности среды;
- влияние фибрового армирования на прочность ячеистого бетона при сжатии и растяжении при кратковременном и длительном воздействии нагрузок;
- влияние фибрового армирования на модули упругости и коэффициент поперечных деформаций;

В НИИЖБе в 80-90-х годах направление, связанное с применением фибры в виде волокнистой добавки в ячеистом бетоне как наиболее перспективное по повышению его трещиностойкости, получило дальнейшее развитие в работах А.Т. Баранова, Т.А. Уховой, А.М. Крохина [8] и др.

Несомненный интерес представляют также работы, в которых изучена возможность повышения физико-механических свойств неавтоклавно пенобетонов при введении полимерных и базальтовых волокон (исследования Г.В. Несветаева, В.Н. Моргун [12, 13], Ю.В. Пухаренко [16], И.О. Суворова [25]), а также автоклавных материалов за счет введения асбестовых волокон.

В настоящее время исследования по дисперсному армированию различными видами фиброволокна проводятся в лаборатории №13 НИИЖБ (В.Ф. Степанова, А.В. Бучкин). В частности, исследования в работе [1] были посвящены применению в бетонах базальтового волокна как наиболее перспективного для фибрового армирования.

Влияние дисперсного армирования на основные физико-механические свойства ячеистого фибробетона

Основные физико-механические свойства ячеистого бетона на известково-песчаном вяжущем (газосиликата), изготовленного с добавками и без добавки асбестового волокна, представлены по данным работы А.М. Крохина [8] в табл. 1.

Введение в ячеистобетонную смесь 1,5-3% асбеста позволяет повысить в 1,21-1,46 раза прочность при изгибе и в 1,24-1,36 раза — при сжатии ячеистого бетона. Как видно из табл. 1, если прочность при изгибе и сжатии сухих образцов обычного ячеистого бетона плотностью 715 кг/м³ составляет соответственно 2,4 и 7,5 МПа, то при введении 3% асбеста получается ячеистый фибробетон плотностью 695 кг/м³, прочностью при изгибе и сжатии, равной соответственно 2,9 и 10 МПа.

Таблица 1

Сравнительная оценка физико-механических показателей ячеистого бетона и фибробетона на известково-песчаном вяжущем, изготовленного с добавкой и без добавки асбестового волокна

В/Т	Содержание асбеста, %	Показатели свойств составов					
		Средняя плотность, кг/м ³	Пористость, %	Прочность на растяжение при изгибе R _{br} , МПа	Прочность при сжатии R _{ср} , МПа	R _{br} /R _{ср}	A, МПа
0,45	0	715	70,5	2,4	7,5	0,32	14,6
0,7	3	695	71,3	2,9	10	0,29	20,7
0,5	0	600	75,2	1,5	5,6	0,268	15,5
0,7	1,5	610	74,8	2,0	7,6	0,263	20,4
0,55	0	525	78,3	1,3	3,8	0,342	14,2
0,8	2	480	80,2	1,9	4,7	0,404	20,1

Примечание: $A = \frac{R_b \cdot 1000^2}{\gamma_o^2}$ — приведенная к $\gamma_o = 1000 \text{ кг/м}^3$ прочность при сжатии сухих образцов ячеистого бетона

Для эффективности дисперсного армирования ячеистого бетона за счет снижения его плотности может быть использована формула

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \gamma_2, \quad (1)$$

где R_1 — предел прочности при сжатии образцов ячеистого бетона плотностью γ_1 ; R_2 — предел прочности при сжатии образцов ячеистого бетона плотностью γ_2 .

Как следует из табл. 1, при плотности ячеистого бетона 715 кг/м³ (состав без дисперсного армирования) и 695 кг/м³ (состав с дисперсным армированием) предел прочности при сжатии равен соответственно 7,5 и 10 МПа. Следовательно, чтобы получить ячеистый бетон без дисперсного армирования с пределом прочности при сжатии 10 МПа, его плотность следует повысить до значения

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{10}{7,5}} 715 = 826 \text{ кг/м}^3,$$

т. е. за счет дисперсного армирования (введения 3% асбеста) его плотность может быть снижена на 111 кг/м³ ~ 100 кг/м³.

С другой стороны, преобразуя формулу (1), можно получить приведенную к плотности $\gamma_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ прочность образцов при сжатии по формуле

$$A = \frac{R_b \cdot 1000^2}{\gamma_0^2}. \quad (2)$$

Значения приведенной прочности образцов с дисперсным армированием, указанные в табл. 1, возросли с 14,2-15,5 до 20,1-20,7 МПа и превышают соответствующие значения для всех образцов без дисперсного армирования, включая, в том числе, образцы с меньшим водо-твердым отношением, как например, образец с В/Т = 0,45, у которого прочности на сжатие и растяжение превышают соответствующие прочности образца при В/Т = 0,8 с дисперсным армированием.

Возрастание физико-механических показателей ячеистого фибробетона на известково-песчаном вяжущем (фиброгазосиликата) наблюдается также с увеличением содержания асбестового волокна (табл. 2).

Увеличение добавки асбеста с 1 до 5% при В/Т = 0,8 обеспечивает повышение прочности при изгибе с 2,1 до 2,9 МПа (в 1,37 раза), а при сжатии — с 8,3 до 10,5 МПа (в 1,265 раза). При этом несколько возрастает и плотность ячеистого бетона с 630 до 680 кг/м³, что связано с повышением вязкости и напряжений сдвига (уменьшением подвижности-текучести) ячеисто-бетонной смеси при увеличении содержания волокон асбеста.

Таблица 2

Влияние количества добавки асбестового волокна на физико-механические показатели ячеистого бетона на известково-песчаном вяжущем (фиброгазосиликата)

В/Т	Содержание асбеста, %	Показатели свойств составов					
		Средняя плотность, кг/м ³	Пористость, %	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа	Прочность при сжатии R_p , МПа	R_{bt}/R_b	A, МПа
0,6	1	610	75,9	1,3	7,4	0,176	19,9
0,6	3	710	71,9	2,9	9,6	0,302	19,0
0,7	1	680	73,1	2,4	9,0	0,267	19,5
0,7	3	700	72,3	2,9	10,0	0,29	20,4
0,7	5	720	70,4	3,2	10,7	0,3	20,7
0,8	1	630	75,1	2,1	8,3	0,253	20,9
0,8	3	650	74,3	2,2	9,7	0,227	23,0
0,8	5	680	73,1	2,9	10,5	0,276	22,7

Фиброгазобетон с добавкой цементно-стойкого стекловолокна также характеризуется повышенными физико-механическими показателями. Добавка 2-8% стекловолокна (табл. 3) обеспечивает увеличение прочности при растяжении в 1,3-1,53 раза, а прочности при сжатии — в 1,2-1,45 раза. Возрастает и соотношение предела прочности при растяжении и предела прочности при сжатии R_{bt}/R_b до 0,24.

Таблица 3

Физико-механические свойства газобетона и фиброгазобетона с добавкой цементостойкого стекловолокна

В/Т	Вяжущее	Количество стекловолокна, %	Показатели свойств составов				
			Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа	Прочность при сжатии R_p , МПа	A, МПа	R_{bt}/R_b
0,45	ПЦ-400	0	650	0,855	4,2	10	0,2
0,47		2	650	1,08	5,5	13,2	0,196
0,5		4	660	1,16	4,9	11,5	0,24
0,58		8	655	1,31	6,1	14,2	0,215

Дисперсное армирование асбестовым волокном обеспечивает возможность в 1,3-1,5 раза повысить прочность при растяжении бетона, а также соотношение R_{bt}/R_b для всех разновидностей ячеистого бетона (табл. 4). Для пенобетона это соотношение повышается в 1,3 раза, для газобетона – в 1,4 раза, а для газосиликата – в 1,1 раза.

Приведенная прочность A для пенобетона с дисперсным армированием увеличивается на 7,6%, для газобетона – на 6,1%, для газосиликата – в 1,21-1,24 раза. В то же время прочность на сжатие для газобетона вообще не увеличивается.

По данным исследований [25], проведенных в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете, дисперсное армирование фибропенобетона плотностью 1200 кг/м³ базальтовым фиброволокном при его объемном содержании 0,6% увеличивает прочность при сжатии на 13,6%. При введении

такого же объема полипропиленовой фибры прочность на сжатие увеличивается на 15,9%.

Таблица 4

Физико-механические свойства ячеистого бетона с добавкой и без добавки асбестового волокна

Вид ячеистого бетона	Вязущее	В/Т	Содержа- ние асбеста, %	Показатели свойств составов				
				Средняя плот- ность, кг/м³	Прочность на растяжение при изгибе R _{br} , МПа	Прочность при сжатии R _p , МПа	A, МПа	R _{br} /R _p
Пенобетон	ПЦ-500	0,55	0	590	0,75	6,0	17,1	0,125
		0,75	4	600	1,05	6,6	18,4	0,16
Газобетон		0,55	0	665	1,05	7,4	16,5	0,14
		0,75	4	570	1,2	5,7	17,5	0,21
Газосиликат	Известково- песчаное	0,45	0	650	1,05	5,9	14,0	0,18
		0,75	3	670	1,5	7,8	17,4	0,19
		0,55	0	520	0,75	4,1	15,2	0,183
		0,75	3	550	1,05	5,5	18,4	0,19

Примечание: При изготовлении пенобетона и газобетона использовался Белгородский портландцемент М-500.

Приведенная прочность A для пенобетона с дисперсным армированием увеличивается на 7,6%, для газобетона – на 6,1%, для газосиликата – в 1,21-1,24 раза. В то же время прочность на сжатие для газобетона вообще не увеличивается.

По данным исследований [25], проведенных в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете, дисперсное армирование фибропенобетона плотностью 1200 кг/м³ базальтовым фиброволокном при его объемном содержании 0,6% увеличивает прочность при сжатии на 13,6%. При введении такого же объема полипропиленовой фибры прочность на сжатие увеличивается на 15,9%.

Наибольшая эффективность дисперсного армирования сказывается на прочности при растяжении, в частности, на растяжение при изгибе. Например, наибольший рост прочности при изгибе с 1,9 до 4 МПа (в 2,11 раза) и соотношения R_{br}/R_b — с 0,43 до 0,8 (в 1,86 раза) по данным работы [25] наблюдается при дисперсном армировании фибропенобетона базальтовым волокном (при его содержании 0,6% по объему). Образцы с полипропиленовой и хризотиловой фиброй характеризуются относительно меньшим приростом прочности на изгиб. Так, например, рост прочности фибропенобетона с полипропиленовым фиброволокном составил 58%, а с хризотил-асбестовой фиброй – 26,3%.

При введении асбестового волокна до 4,5% (от массы сухих компонентов) в газосиликат плотностью D700 соотношение R_{br}/R_b увеличивается только на 12,7%. При введении 5% асбеста в теплоизоляционный газосиликат плотностью D200 это соотношение несколько увеличивается (на 29,2%).

На основании указанных исследований рекомендуется принимать оптимальное содержание базальтовой, полипропиленовой и хризотиловой фибр в диапазоне 0,6–0,65% по объему, что обеспечивает максимальные значения прочности фибропенобетона при изгибе и при сжатии. В частности, для базальтовой фибры оптимальный процент фибрового армирования рекомендуется принимать равным 0,6%, а для полипропиленовой и хризотиловой фибр – 0,6–0,65%. Для хризотиловой фибры для обеспечения наибольшей прочности при сжатии оптимальный процент можно принимать 0,8%. При этом дальнейшее увеличение содержания фибрового армирования более 0,8% не рекомендуется ввиду получения дефектной структуры фибропенобетона и, соответственно, снижения его прочности.

Кроме этого, рекомендуется в качестве наиболее эффективного варианта фибрового армирования применять полиармирование (т. е. совместное введение в состав фибропенобетонной смеси двух или нескольких видов фиброволокна) с оптимальной комбинацией низкомодульных и высокомодульных армирующих волокон, что обеспечивает в комплексе наименьшие усадочные деформации и, одновременно, — относительно высокую прочность на изгиб. Например, использовать комбинацию из полипропиленовых и базальтовых волокон в количестве 0,2 и 0,4% соответственно.

Из проблематики в области материаловедения известно, что большинство конструкционных материалов в настоящее время нуждается не в повышении прочности как таковой, а в снижении хрупкости. Дисперсное армирование в этой связи является одним из наиболее эффективных средств для повышения сопротивления хрупкому разрушению. Эффективность дисперсного армирования наглядно проиллюстрирована на графике, отражающем влияние дисперсного армирования ячеистого бетона на работу при разрушении (рисунок), а также по данным табл. 5.

Работа разрушения численно равна половине произведения усилия разрушения на величину предельной деформации, т. е. заштрихованному участку на диаграмме зависимости напряжений и деформаций при сжатии в ячеистом бетоне (см. рисунок).

Таблица 5

Влияние дисперсного армирования на физико-механические характеристики и удельную работу при разрушении ячеистого бетона (газобетона) автоклавного твердения

В/Т	Содержание асбеста, %	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии R_v , МПа	Прочность на растяжение при изгибе R_{br} , МПа	Предельная растяжимость, мм/м	Начальный модуль упругости, МПа	Удельная работа разрушения, Дж/м ³
0,55	0	520	4,1	0,8	0,32	2550	128
0,75	3	550	5,5	1,1	0,36	2980	198
0,5	0	610	5,2	1,0	0,37	2710	185
0,75	3	590	6,3	1,2	0,47	2860	282
0,45	0	650	5,9	1,1	0,41	2800	226
0,75	3	670	7,8	1,5	0,43	3520	322

Примечание: Образцы испытывались с влажностью 10-12%.

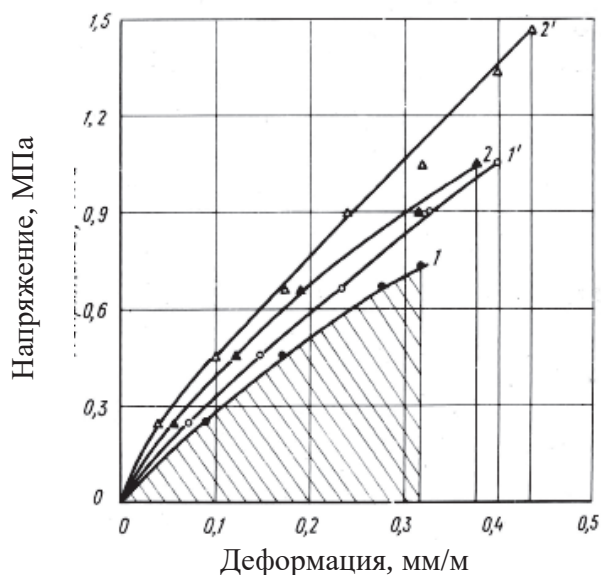


Рисунок. График зависимости напряжений и деформаций при сжатии образцов ячеистого бетона с добавкой и без добавки асбестового волокна: 1, 1' — ячеистый бетон без добавки асбестового волокна плотностью 520 и 650 кг/м³; 2, 2' — ячеистый бетон с добавкой асбестового волокна плотностью 550 и 670 кг/м³

Опытные составы сырьевой шихты дисперсно-армированного автоклавного газосиликата

Содержание основных компонентов, мас. %								
Гашеная известь	Негашеная известь с добавкой 10% песка удельной поверхностью 4900-5200 см ² /г	Песок молотый дисперсностью 2000 см ² /г	Песок молотый дисперсностью 3000 см ² /г	Песок молотый дисперсностью 4000 см ² /г	Шлакопортланд-цемент	Гипс двуводный	В/Т	Добавка низко-сортного асбеста (К-6-20)
-	26	64	-	-	7,5	2,5	0,45	-
-	26	64	-	-	7,5	2,5	0,65	2,5
8	26	-	56	-	7,5	2,5	0,7	3,0
19	26	-	-	45	7,5	2,5	0,8	4,5

Примечание: 1.

В составе сырьевой шихты применялись:

- известь Копанищенского завода активностью 70-85% со скоростью гашения 15-20 мин. и температурой гашения 75-90 °С, содержание MgO — 3-4%, количество непогасившихся частиц — 10%;
- негашеная известь с активностью CaO + MgO — 79 % и гашеная известь, полученная в виде пушонки;
- гипс строительный Новомосковского комбината, тонкость помола которого характеризовалась остатком на сите № 02 до 15%;
- газообразователь — алюминиевая пудра ПАП-1 и ПАП-2, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 5494-71 «Пудра алюминиевая пигментная». В качестве ПАВ для гидрофилизации частиц алюминиевой пудры применялся сульфатол, удовлетворяющий требованиям ТУ 6-01-1001-75;
- асбест хризотилковый марки К-6-20 и К-6-30 с длиной волокон 0,7-1 мм.

Указанная оценка является достаточно точной, так как зависимость деформаций от напряжения для ячеистого бетона близка к прямолинейной.

Как следует из табл. 5, введение в ячеисто-бетонную смесь асбеста в количестве 3% от массы сухих компонентов приводит к повышению удельной работы разрушения бетона в 1,4-1,5 раза и к увеличению его предельной растяжимости на 15-20%.

Кроме этого, дисперсное армирование повышает также начальный модуль упругости ячеистого бетона на 5,5-25,7%.

В табл. 6 приведены опытные заводские составы дисперсно-армированного автоклавного газосиликата марки по плотности D700 для изготовления стеновых блоков с его основными физико-механическими характеристиками и коэффициентом конструктивного качества (ККК), определяемым как отношение прочности ячеистого бетона при сжатии к его средней плотности в г/см³, т. е.

$$К.К.К = R_b/D. \quad (3)$$

В табл. 7 приведены основные физико-механические свойства теплоизоляционного газосиликата средней плотностью 190-242 кг/м³, полученного на оптимальных составах сырьевой шихты согласно «Руководству по технологии изготовления ячеистого бетона плотностью 250-300 кг/м³» [17].

Таблица 6

марки по плотности D700 для изготовления стеновых блоков 30×40×80 на заводе НИПИ «Силикатбетон» по данным [8]

Показатели свойств				Коэфф. конструктивного качества ККК
Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии R _b , МПа	Прочность на растяжение при изгибе R _{bt} , МПа	R _{bt} /R _b	
688	5,85	0,64	0,11	8,5
682	7,62	1,1	0,144	11,17
696	8,93	1,275	0,143	12,79
731	11,0	1,37	0,124	15,05

Основные физико-механические свойства теплоизоляционного газосиликата и

Содержание основных компонентов, мас. %						
Гашеная известь	Негашеная известь	Песок молотый дисперсностью 4900-5100 см ² /г	Полуводный гипс	Доменный шлак	В/Т	Добавка низкосортного асбеста (К-6-20)
15	25	48	2-3	8-10	0,57	-
13	27	47	2-3	8-10	0,72	2
13	27	48	2-3	8-10	0,78	3
10	29	49	2-3	8-10	0,85	5

Примечание: Рассмотренные составы сырьевой шихты вошли в «Руководство по технологии изготовления ячеистого бетона плотностью 250-300 кг/м³».

Как видно из табл. 6 и 7, ККК для ячеистого бетона с дисперсным армированием больше, чем для бетона без него, и повышается с увеличением содержания армирования даже для случая теплоизоляционного газосиликата, у которого прочность на сжатие (в отличие от прочности на растяжение) не увеличивается с введением волокнистой добавки.

Особенности проектирования и расчета конструкций из ячеистого фибробетона

Рекомендуется нормируемые прочностные характеристики ячеистого фибробетона при проектировании и расчете конструкций из него принимать по результатам статистической обработки данных испытаний контрольных образцов на осевое растяжение или на растяжение при изгибе. При этом остаточную прочность ячеистого фибробетона определять по результатам испытаний образцов с надрезом согласно Приложению Б в СП 297.1325800.2017 [22].

При этом на основании обработки имеющихся опытных данных допускается нормативные сопротивления ячеистого фибробетона при растяжении для предельных состояний второй группы и расчетные сопротивления при растяжении для предельных состояний первой группы при расчете крупноразмерных конструкций принимать по таблицам 6.7 и 6.8 в СП 63.13330.2012 [20], а также по таблицам 5.1 и 5.3 в СП 339.1325800.2017 [19] в зависимости от вида фиброволокна со следующими повышающими коэффициентами*:

1,2 – для фибропенобетона плотностью D1200 и газосиликата автоклавного твердения марки по средней плотности D500-D700 с хризотил-асбестовым волокном;

1,5 – для фибропенобетона с полипропиленовой и полиамидной фиброй;

1,8 – для фибропенобетона с базальтовой фиброй;

1,1 – для теплоизоляционного автоклавного фиброгазобетона марки по средней плотности D150 с базальтовой микрофиброй;

1,3 – для фиброгазобетона автоклавного твердения с цементостойким стекловолокном;

фиброгазосиликата, полученного на оптимальных составах сырьевой шихты по данным [8]

Показатели свойств				Коэфф. конструк- тивного качества ККК
Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии R_b , МПа	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа	R_{bt}/R_b	
242	1,013	0,18	0,178	4,186
220	0,94	0,19	0,202	4,27
235	1,1	0,23	0,21	4,68
190	0,87	0,2	0,23	4,58

1,3 – для конструкционно-теплоизоляционного газосиликата автоклавного твердения марки по средней плотности D400 с целлюлозной фиброй.

* Значения повышающих коэффициентов приведены для составов ячеистых фибробетонов с оптимальным содержанием фиброволокна.

Расчет кладки стены при работе ее как в плоскости, так и из плоскости рекомендуется выполнять, моделируя стену методом конечных элементов.

В соответствии с СТО НОСТРОЙ 2.9.136-2013 [24, Приложение Г] кладка поэтажно опертой стены заполняет внутреннее пространство рамы, состоящей из двух колонн и двух ригелей и являющейся моделью ячейки каркаса здания. Элементы кладки моделируются ортотропными конечными элементами (КЭ) типа «балка-стенка». Жесткостные характеристики ортотропных элементов кладки назначаются по СП 15.13330.2012 [18].

Закрепление рамы осуществляют жесткими связями в уровне нижнего обреза колонн. Элементы колонн, ригелей, пенополистирольных вкладышей моделируют прямоугольными КЭ. Для моделирования взаимного контакта фрагмента кладки и элементов каркаса, фрагмента кладки и упругой прокладки, упругой прокладки и элементов каркаса используют двухузловые элементы односторонних связей.

По результатам расчета модели стены выполняется оценка прочности кладки стены, для чего значения полученных напряжений растяжения, сжатия, а также среза сравнивают с расчетным сопротивлением кладки растяжению при изгибе по перевязанному сечению, а также сжатию и срезу по неперевязанному сечению. При этом расчетные сопротивления осевому растяжению, растяжению при изгибе, и главные растягивающие напряжения при изгибе при расчете кладки по перевязанному сечению, проходящему по блокам из ячеистого фибробетона, принимаются согласно п. 6.17 по СП 15.13330.2012 [18, табл. 12] с учетом указанных выше повышающих коэффициентов.

Заключение

1. Дисперсное армирование, по разным оценкам, обеспечивает возможность повысить в 1,2-2,11 раза прочность на растяжение при изгибе R_{bt} ячеистого фибробетона, а также соотношение R_{bt}/R_b , причем тенденция возрастания R_{bt} и соотношения R_{bt}/R_b прослеживается как для ячеистого бетона неавтоклавного твердения (фибропенобетоны), так и для ячеистого фибробетона автоклавного твердения (фиброгазобетоны). При этом интенсивность роста прочности зависит от вида фиброволокна и конкретного состава ячеистобетонной смеси с определенным значением В/Т.

Кроме этого, рекомендуется в качестве наиболее эффективного варианта фибрового армирования применять полиармирование (т. е. совместное введение в состав фибропенобетонной смеси двух или нескольких видов фиброволокна) с оптимальной комбинацией низкомодульных и высокомодульных армирующих волокон, что обеспечивает в комплексе наименьшие усадочные деформации и, одновременно, — относительно высокую прочность на изгиб.

2. Дисперсное армирование ячеистого бетона позволяет повысить не только прочность на растяжение при изгибе, но также и прочность на сжатие. При этом процент увеличения прочности зависит от вида фиброволокна и от конкретного состава ячеистобетонной смеси с определенным значением В/Т.

Кроме этого, более стабильными показателями ячеистого бетона и фибробетона являются приведенная (к плотности 1000 кг/м^3) прочность и коэффициент ККК. Более высокий прирост этих показателей по сравнению с прочностью на сжатие как таковой в наибольшей степени отражает эффективность дисперсного армирования ячеистого фибробетона.

Более высокая величина приведенной прочности дисперсно армированного ячеистого фибробетона, с другой стороны, является фактором возможности снижения его плотности при условии равнопрочности с обычным ячеистым бетоном.

Коэффициент ККК, определяемый как отношение прочности ячеистого бетона при сжатии к его средней плотности для ячеистого фибробетона с дисперсным армированием больше, чем для бетона без него, и повышается с увеличением содержания фиброволокна.

3. Дисперсное армирование положительно влияет на деформационные характеристики ячеистого бетона. Дисперсное армирование повышает начальный модуль упругости ячеистого бетона и увеличивает его предельную растяжимость.

4. Дисперсное армирование является одним из наиболее эффективных средств для повышения сопротивления хрупкому разрушению. Эффективность дисперсного армирования можно оценить величиной удельной работы разрушения ячеистого бетона.

5. Рекомендуется при проектировании и расчете конструкций из ячеистого фибробетона нормируемые прочностные характеристики ячеистого фибробетона (в

частности, остаточную прочность на растяжение) определять по результатам испытаний образцов с надрезом согласно Приложения Б СП 297.1325800.2017.

Кроме этого, нормативные сопротивления ячеистого фибробетона при растяжении для предельных состояний второй группы и расчетные сопротивления при растяжении для предельных состояний первой группы при расчете крупноразмерных конструкций допускается принимать согласно СП 63.13330.2012 по таблицам 6.7 и 6.8, а также согласно СП 339.1325800.2017 по таблицам 5.1 и 5.3 с приведенными выше повышающими коэффициентами в зависимости от вида фиброволокна.

Расчетные сопротивления осевому растяжению, растяжению при изгибе, и главные растягивающие напряжения при изгибе при расчете кладки из мелких ячеистофибробетонных блоков по перевязанному сечению, проходящему по блоку, рекомендуется принимать согласно п. 6.17 по таблице 12 СП 15.13330.2012 с учетом указанных повышающих коэффициентов.

Расчет кладки стены рекомендуется выполнять, моделируя кладку ортотропными конечными элементами типа «балка-стенка». Жесткостные характеристики ортотропных элементов кладки назначаются по СП 15.13330.

Библиографический список

1. Бучкин А.В. Мелкозернистый бетон высокой коррозионной стойкости, армированный тонким базальтовым волокном, Автореф. ... канд. техн. наук. 05.23.05 «Строительные материалы и изделия». Бучкин Андрей Викторович., Москва, 2011.
2. Беркович Т.М. Автоклавный асбестоцемент. — М.: Промстройиздат, 1957.
3. Воробьев К.С., Бортников В.Г., Данилова С.Г. Дисперсно-армированный ячеистый бетон / В сб. «Дисперсно-армированные бетоны и конструкции из них». ЛатНИТИ, Рига, 1975.
4. Зайцев Ю.В. Деформации и прочность цементного камня и бетона с учетом трещин в микро- и макроструктуре. Дисс. ... д-ра техн. наук, 05.23.01. «Строительные конструкции». Зайцев Юрий Владимирович Москва, 1975.
5. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. — М.: Стройиздат, 1982.
6. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. — М.: Стройиздат, 1996.
7. Крашенинников А.Н. Классификация ячеистых бетонов и совершенствование технологии их производства / Сб. «Жилые дома из ячеистого бетона». — л.: Госстройиздат, 1963.
8. Крохин А.М. Автоклавный ячеистый бетон с повышенной прочностью при растяжении. / Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Крохин Алексей Митрофанович, Москва, 1979.
9. Лобастов А.В. Асбестовый отход как заполнитель теплоизоляционного газобетона. «Строительные материалы», 1963, №4.
10. Механика разрушения для строителей: под ред. Ю.В. Зайцева. — М.: Высшая школа, 1991.
11. Макарычев В.В. О ячеистом бетоне, армированном волокнами. / Сб. НИИЖБ «Фи-

бробетон и его применение в строительстве».— М. НИИЖБ Госстроя СССР, 1979. С. 85-88.

12. *Моргун В.Н.* Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавногo твердения с компенсированной усадкой. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Моргун Владимир Николаевич. , Ростов –на-Дону, 2004.

13. *Моргун В.Н., Талпа Б.В.* Влияние вида дисперсной арматуры на свойства пенобетонов // Строительные материалы. — 2008. — №6. — С.48-49.

14. *Пирадов К.А., Бисенов К.А., Абдуллаев К.У.* Механика разрушения бетона и железобетона. — Алматы: Издательский центр ВАК РК Министерства образования и науки РК, 2000.

15. *Пирадов К.А., Гузеев Е.А.* Механика разрушения железобетона. ГНЦ «Строительство» РФ, Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ). М., ИЦ «Новый век», 1998.

16. *Пухаренко Ю.В.* Фиброармированные бетоны: свойства и применение в строительстве: Учебное пособие. — СПб, 2016.

17. Руководство по технологии изготовления ячеистого бетона плотностью 250-300 кг/м³. М., 1977.

18. СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81*.

19. СП 339.1325800.2017. Конструкции из ячеистых бетонов. Правила проектирования.

20. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

22. СП 297.1325800.2017. Конструкции фибробетонные с неметаллической фиброй. Правила проектирования.

23. *Стольников В.В., Литвинова Р.Е.* Трещиностойкость бетона. — М.: Энергия, 1972.

24. СТО НОСТРОЙ 2.9.136-2013. Строительные конструкции зданий и сооружений, устройство конструкций с применением изделий и армированных элементов из ячеистых бетонов автоклавногo твердения. Правила, контроль выполнения к результатам работ, рекомендации по применению». НП «Союз предприятий строительной индустрии Свердловской области. Центральный институт типового проектирования им. Г.К.Орджоникидзе. М., 2016.

25. *Суворов И.О.* Дисперсное полиармирование как способ снижения усадки фибропенобетона / Дисс. ... канд. техн. наук. 05.23.05 – «Строительные материалы и изделия». Суворов Иван Олегович Санкт-Петербург, 2015.

26. *Флек Л.В.* Теоретическое и прикладное материаловедение. — М.: Атомиздат, 1975.

27. *Шатава В., Шкрдлик Я.* Пористый бетон Силикорк. — М.: Госстройиздат, 1962.

28. *Griffith A.A.* The phenomenon of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. A221. 1920.

29. *Irwin G.R.* Fracture dynamics. «Fracturing of Metals» ASM. Cleveland. 1948.

30. *Irwin G.R.* Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate // J Appl. Mech. 24.1957.

31. *Irwin G.R.* Plastic zone near a crack and fracture toughness, 7th Sagamore Ardanee

Materials Research Conference, Syracuse, Univ. Press., 1960.

32. *Orowan E.O.* Fundamentals of brittle behaviour of metals, «Fatigue and Fracture of Metals» (Murray W.M. ed) Wiley. New York.

Авторы:

Валерий Николаевич СТРОЦКИЙ, канд. техн. наук, заведующий сектором лаборатории технологии бетонов НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Valeriy STROTSKIY, Ph.D. (Engineering), Head of the Sector of the Laboratory of Concrete Technology of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: np.ots@mail.ru

Алексей Митрофанович КРОХИН, канд. техн. наук, заместитель генерального директора ООО «Холдингвibroпресс», Москва

Aleksey KROKHIN, Ph.D. (Engineering), Deputy General Director of LLC «Holdingvibropress», Moscow
e-mail: veter1790@mail.ru
тел.: +7 (916) 507-57-98

Владимир Иванович САВИН, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vladimir SAVIN, Ph.D. (Engineering), Leading Researcher of the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: tamaximova@mail.ru
тел.: +7 (499) 174-76-31

Сергей Григорьевич ЗИМИН, инженер лаборатории технологии бетонов НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва

Sergey ZIMIN, engineer of the Laboratory of Concrete Technology NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: niigb@mail.ru
тел.: +7(499) 174-75-92