

УДК 691.322

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФИБРЫ В ПЕНОБЕТОНАХ НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

В.А. ХВАТЫНЕЦ

(Представлено: канд. тех. наук, доц. Л.М. ПАРФЁНОВА)

*Показаны преимущества пенобетонов. В качестве недостатка пенобетона отмечена усадка при твердении. Рассмотрено применение фибры как эффективной меры предотвращения усадочных деформаций. Выявлены критерии, определяющие эффективность применения фибры в пенобетоне. Рассмотрено влияние базальтовых, полиамидных, полипропиленовых волокон на структурообразование и физико-механические свойства пенобетонов неавтоклавнового твердения.*

Ячеистый бетон неавтоклавнового твердения является достаточно популярным материалом в строительстве, благодаря относительно невысокой себестоимости, простоте технологического производства и широкой сфере применения, включающей как изготовление блоков, панелей, перегородочных плит, так и применение в монолитном домостроении. Средняя плотность пенобетона может варьироваться от 300 до 1200 кг/м<sup>3</sup>. Пенобетоны характеризуются прекрасными звуко- (35...66 дБ), теплоизоляционными (0,05...0,52 Вт/м·°С) свойствами, удобообрабатываемостью (гвоздимость, фрезерование, пиление, сверление и т.п.) при укладке в дело и рядом других полезных свойств [1]. При этом одним из факторов, сдерживающих широкое применение неавтоклавнового пенобетона для производства крупногабаритных изделий и в монолитном строительстве, является усадка при твердении, снижающая его трещиностойкость. В качестве мер, позволяющих исключить возможность проявления усадочных деформаций, широко применяется дисперсное армирование волокнами, отличающимися по своему составу от материала матрицы и способные в процессе работы пенобетона воспринимать более высокие по сравнению с матрицей растягивающие напряжения [2-4]. Материалы, применяемые в качестве фибры, поделены на три класса по величине собственного модуля упругости в сравнении с модулем продольной упругости бетона ( $E_s = (0,2...0,25) \cdot 10^5$  МПа): высокомодульную, среднемодульную и низкомодульную фибру. К высокомодульной фибре ( $E_f > E_s$ ) относятся волокна углерода, волокна бора, стальная фибра. К среднемодульной, упругие свойства которой соизмеримы со свойствами бетона, относятся стекловолокно, минеральные и некоторые синтетические волокна. К низкомодульной фибре ( $E_f < E_s$ ) относятся натуральные волокна (хлопок, дерево и др.), полимерные волокна (полипропиленовая фибра и др.). Дисперсное армирование может осуществляться одним видом фибры или смесью разных (табл. 1) [5].

Таблица 1. – Физико-механические свойства волокон, применяемых для дисперсного армирования бетонов

Наименование волокна	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль Юнга, 10 <sup>-3</sup> МПа	Прочность на растяжение, 10 <sup>-3</sup> МПа	Удлинение при разрыве, %
Полипропиленовое	0,9	3,5–8	0,4–0,77	10–25
Полиэтиленовое	0,95	1,4–4,2	0,7	10
Нейлоновое	1,1	4,2	0,77–0,84	16–20
Акриловое	1,1	2,1	0,21–0,42	25–45
Полиэфирное	1,4	8,4	0,73–0,78	11–13
Углеродное	2,0	245	2	1
Хлопковое	1,5	4,9	0,42–0,7	3–10
Асбестовое	2,6	68	0,91–3,1	0,6
Стеклоанное	2,6	70–80	1,05–3,85	1,5–3,5
Базальтовое	2,6	80–100	1,6–3,6	1,4–3,6
Стальные фибры	7,8	200	0,80–3,15	3–4

В ходе проведенного в работах [6, 7] анализа были установлены критерии, определяющие эффективность применения фибры в бетонах. Отмечено, что в первую очередь, эффективность дисперсного армирования бетонов зависит от соотношения прочностных и деформативных характеристик армирующих волокон (фибры) и бетонной матрицы. Если модуль упругости фибры существенно (в 3...10 раз) превышает модуль упругости бетона, то следует ожидать повышения механической прочности, трещиностойкости и улучшения других эксплуатационных свойств дисперсно армированного бетона. Если

модуль упругости фибры близок к показателю модуля упругости бетона, либо несколько меньше его, то будет иметь место повышение работы разрушения материала при одновременном снижении конструктивных свойств. В качестве второго критерия предложено рассматривать предельную растяжимость фибры. При использовании фибры, предельная деформативность которой больше предельной деформативности бетона, под действием предельных нагрузок разрушение происходит не мгновенно, как это наблюдается в хрупких материалах, а медленно, то есть вязко.

Калугиным И.Г. в работе [8] установлено, что при использовании базальтовых волокон базальто-пенобетонные конструкции могут выдерживать большие напряженные деформации благодаря тому, что само волокно при растяжении пластических деформаций не имеет. При этом относительная деформация цементного камня без образования трещин достигает  $0,9 \div 1,1$  %. Такая деформация в  $45 \div 55$  раз превышает граничное удлинение неармированного цементного камня. При использовании волокон прочность практически не уменьшается. Увеличение прочности цементного камня происходит за счет влияния базальтового волокна на концентрации напряжений в местах, ослабленных структурными дефектами, либо повышенной пористости.

В работе [9, 10] были выделены три стадии напряженно-деформированного состояния при нагружении бетонных образцов, дисперсно армированных полиамидными волокнами. Первая стадия - упругая работа материала до появления трещин в растянутой зоне бетона, когда напряжения меньше временного сопротивления бетонной матрицы растяжению и растягивающие усилия воспринимаются дисперсной арматурой и матрицей совместно. Эта стадия характеризуется прогибами, не превышающими  $1/900$  пролёта при коэффициенте вариации 19%. Ко второй стадии отнесена работа постепенного накопления трещин в растянутой зоне фибропенобетона. Объединение первичных трещин в магистральную начинается при нагрузке в  $1,6 \dots 2,0$  раза превышающей нагрузку первой трещины. Величина прогибов во второй стадии работы разрушения достигает  $1/160$  пролёта. Третьей стадии соответствует интенсивное раскрытие магистральной трещины, связанное с тем, что напряжения в дисперсной арматуре достигли предела её текучести. Эта стадия завершается потерей несущей способности образца. Разрушение вызвано прогрессирующим ростом прогибов, величина которых достигает  $1/34$  пролёта. Утрата несущей способности не приводит к раздроблению сжатой зоны образцов и разделению их на отдельные куски. Величина разрушающей нагрузки в  $2,5 \dots 3,0$  раза превышает нагрузку, соответствующую появлению первой трещины.

Проведенное в работе [11] исследование процессов структурообразования фибропенобетонных неавтоклавного твердения показало, что дисперсное армирование пенобетонных смесей организует структуру зернистых частиц в составе межпоровых перегородок. К фибре как области максимальных сдвиговых напряжений перемещаются при перемешивании мельчайшие частицы твёрдой фазы и плотно укладываются на её поверхности, отжимая свободную влагу в сторону плёнок ПАВ. Фибра после завершения перемешивания смеси, с одной стороны, ограничивает возможность смещения частиц твёрдой фазы при перераспределении межчастичной влаги в ходе гидратации и твердения вяжущего, а с другой стороны - становится тем конструктивным элементом, который является основой для формирования плотного кластера, обеспечивает комфортные условия твердения цементным новообразованиям и, таким образом, становится способной защитить сформированную при перемешивании ячеистую структуру от расслоения при ослаблении упругих свойств водных плёнок ПАВ.

Стешенко А.Б. в работе [12] установлено, что при равномерном распределении базальтовых, полипропиленовых и хризотил-асбестовых волокон диаметром  $18-30$  мкм в межпоровых перегородках пенобетона за счет снижения напряжений при структурообразовании поризованных цементных композиций на границе раздела фаз уменьшается пластическая усадка на  $37-45$  % и усадка при высыхании на  $40-50$  %. При этом при оптимальных дозировках фибры формируется однородная структура с хорошими связями в контактной зоне, что приводит к повышению прочности на сжатие и класса пенобетона. Показано, что при введении микроармирующих волокон прочность цементного камня увеличивается на всех стадиях твердения ( $1-28$  суток). При армировании цементного камня базальтовыми волокнами прочность повышается на  $5$  %, при армировании полипропиленовыми волокнами - на  $3$  %, а при введении хризотил-асбестовых волокон - на  $6$  %. Усадочные деформации пенобетона с применением базальтовых волокон уменьшаются на  $47$  %, с применением полипропиленовых волокон - на  $40$  %. Максимальное снижение усадочных деформаций при высыхании на  $50$  % наблюдается при использовании хризотил-асбестовых волокон и пластификатора Неолас.

Улучшение физико-механических свойств фибропенобетона объяснено протеканием следующих процессов: 1) введение микроармирующих волокон и пластифицирующих добавок способствует стабилизации структуры пенобетона, за счет чего образуются замкнутые мелкодисперсные поры и обеспечивается отсутствие протекания жидкости в стенках пор; 2) минеральные волокна, обладая рыхлой веретенообразной структурой, хемосорбционно взаимодействуют с соединениями цементного теста, вызывая в зоне контакта рост новообразований низкоосновных гидросиликатов кальция, что упрочняет структуру матрицы за счет сцепления; 3) введение микроармирующих волокон и пластифицирующих добавок по-

вышает площадь контактов цементной матрицы и ее плотность, увеличивает степень кристаллизации и гидратации цементной системы вследствие хемосорбции волокон.

Таким образом, эффективность фибрового армирования зависит от объемного содержания фибры и их механических и термохимических свойств, соотношение между параметрами фибровой арматуры и параметрами структуры бетонной матрицы, длины фибры и уровня дисперсности армирования. Установлено, что в случае, когда модуль упругости фибры превышает модуль упругости бетона, то повышается трещиностойкость, механическая прочность, а также прочие эксплуатационные характеристики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков, В.И. Производство изделий из ячеистого бетона по резательной технологии / В.И. Юольшаков, В.А. Мартыненко, В.В. Ястребцов. – Днепропетровск : Пороги, 2003. – С. 141.
2. Пухаренко Ю.В. Технология теплоизоляционных ячеистых бетонов, армированных синтетическими волокнами. Автореферат дисс. к.т.н., Л., ЛИСИ, 1986. -23 с.
3. Крохин А.М. Автоклавный ячеистый бетон с повышенной прочностью при растяжении. Автореферат дисс. к.т.н., М., НИИЖБ, 1979. - 22 с.
4. Лобанов И.А. Основы технологии дисперсно армированных бетонов(фибробетонов). Автореферат дисс. д.т.н., Л., ЛИСИ, 1983. - 36 с.
5. Парфенова, Л.М. Качан, М.С. Физико-механические свойства бетонов с полиакрилонитрильными волокнами / Л.М. Парфёнова, М.С. Качан // Вестник Полоцкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки. – Новополоцк: ПГУ, 2011. – С. 30–34
6. Макаричев В.В. О ячеистом бетоне, армированном волокнами//Фибробетон и его применение в строительстве. М., НИИЖБ, 1979. С.28...33.
7. Моргун Л.В. Физико-химические основы механики композиционных материалов. Ростов-на-Дону, РГАС, 1994. - 75 с.
8. Калугин И.Г. Пенобетоны дисперсно-армированные базальтовым волокном: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / И.Г. Калугин; Красноярск, 2011. – 22 с.
9. Сари М., Лекселент Дж., Решерш Р. Армированные волокнами вяжущие композиционные материалы: вклад полиамидных волокон.// Вкн.: Современные технологии сухих смесей в строительстве "MixBULD". Сб. докладов под общ. редакцией Большакова Э.Л. - С- Петербург, ГУПС, 2001. - С.48...60.
10. Моргун Л.В. Свойства фибропенобетонов, армированных полиамидными волокнами. Дисс. к.т.н. Ленинград: ЛИСИ, 1986. -169 с.
11. Моргун В.Н. Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения с компенсированной усадкой: дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / В.Н. Моргун; Ростов-на-Дону, 2004. – 178 с.
12. Стешенко А.Б. Модифицированный теплоизоляционный пенобетон с пониженной усадкой: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / А.Б. Стешенко; Томск, 2015. – 24 с.