

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ АРМИРОВАНИЯ КЕРАМЗИТОБЕТОНА ПОЛИМЕРНЫМИ ВОЛОКНАМИ**

*МОСКАЛЬКОВА Ю. Г., СЕМЕНЮК Р. П., ДАШКЕВИЧ М. Ю.*

Белорусско-Российский университет  
Могилев, Беларусь

Неоспоримыми достоинствами керамзитобетона по сравнению с традиционным тяжелым бетоном являются его небольшой удельный вес, низкая теплопроводность и хорошая морозостойкость, что делает его перспективным материалом для производства не только ограждающих, но и несущих конструкций. Однако для конструктивных легких бетонов определяющую роль играют недостатки: сравнительно малая прочность, значительные усадка и ползучесть, высокая истираемость. Указанные недостатки можно частично компенсировать введением в тело бетона фибровой арматуры.

Полимерная фибра имеет ряд преимуществ по сравнению со стальной: она повышает устойчивость бетона к истиранию, повышает сопротивление усталости, уменьшает усадочные деформации, способствует быстрому набору прочности, снижает влияние перепада температур и атмосферных воздействий, препятствует проникновению в тело бетона влаги (что актуально именно для легких бетонов, имеющих пористую структуру). Кроме того, синтетические волокна обладают коррозионной стойкостью и химической стойкостью к продуктам гидратации портландцемента.

Однако полимерная фибра за счет малой смачиваемости имеет плохую адгезию к цементному камню. Поэтому эффективность фибрового армирования может быть достигнута только путем ее заанкеривания в цементной матрице: для синтетических волокон применяются такие варианты как скручивание волокон в жгут или волокна, имеющие форму спирали.

Основной технологической проблемой фибрового армирования бетонов является склонность фибры к комкованию (образованию «ежей»). Это актуально для стальной фибры, но в меньшей степени относится к синтетическим волокнам в связи с низкой адгезией

к цементной матрице. Короткие полимерные волокна наименее склонны к комкованию. Фибровую арматуру лучше добавлять в сухую бетонную смесь до затворения водой.

В работе [1] отмечено, что распределение волокон в бетоне является одним из определяющих факторов, влияющих на эффективность фибрового армирования: однонаправленное распределение волокон обеспечивает наибольшую эффективность применения фибры, но, как правило, в построечных условиях имеет место трехмерное хаотичное распределение волокон, которое позволяет обеспечить эффективность применения фибрового армирования не более 20 % (таблица 1) [2].

Таблица

Эффективность использования армирующей фибры  
в зависимости от распределения волокон в бетоне

Распределение волокон	Условная прочность, %
Однонаправленное	100 (вдоль волокон)
Сетчатое	45–50
Двухмерное хаотичное	30–37
Трехмерное хаотичное	0–20

В европейских стандартах prEN 14889 приведена классификация фибровых волокон:

- фибра для улучшения пластических свойств;
- фибра для улучшения эксплуатационных характеристик;
- фибра для повышения прочности на изгиб;
- фибра для повышения сопротивления взрывному разрушению материала при пожаре.

В белорусском варианте prEN 14889 – СТБ EN 14889-2 [3] – определены требования, предъявляемые к полимерным волокнам и строительному раствору. В документе отсутствуют указания по приготoвлению бетонной смеси, дозированию компонентов и т. п. Прописано только, что производитель должен предоставить руководство с указанием рекомендуемого порядка производства бетонной смеси.

Таким образом, на сегодняшний день в Беларуси фактически отсутствует нормативная база, регламентирующая четкие требования по дисперсному армированию конструкционных бетонов.

Все существующие документы носят ведомственный характер. В частности, ТКП 45-5.03-301–2015, устанавливающий правила изготовления изделий и конструкций из сталефибробетона, был отменен 01.01.2018 г. без введения альтернативного (заменяющего) ТНПА.

Еще одна сложность заключается в производстве керамзитобетонной матрицы, поскольку такой важный фактор, как водоцементное отношение (В/Ц), для легких бетонов не может быть заранее точно определен, поскольку зависит от прочности частиц заполнителя, объемной плотности, степени уплотнения частиц, а эти параметры для легких заполнителей разного происхождения существенно отличаются. Поэтому необходимо делать пробные замесы для каждого конкретного состава керамзитобетонной смеси для определения оптимального В/Ц: слишком низкое водоцементное соотношение приведет к недостаточной агломерации частиц заполнителей, слишком высокое – к снижению прочности. Данное утверждение экспериментально обосновано в работе [4].

Особенностью бетонов, армированных синтетическими волокнами, являются ограничения в применении крупного заполнителя [5, 6], поэтому в данной ситуации невозможно создание беспесчаных или малопесчаных бетонов (перспективного направления в производстве легких бетонов).

В качестве мелкого заполнителя для получения конструкционного керамзитобетона лучше использовать плотный природный кварцевый песок, а не пористый заполнитель (например, керамзитовый песок), поскольку в первом случае прочность на сжатие полученного бетона будет значительно выше [4].

В целом анализ данных, представленных в [6, 7], показывает, что полимерное армирование существенно не влияет на прочность бетона при статическом однократном осевом сжатии, растяжении и изгибе, т. к. модуль упругости волокон меньше модуля упругости цементной матрицы.

Однако экспериментальные исследования подтверждают факт роста прочности бетона в результате дисперсного армирования полимерной фиброй, несмотря на ее низкий модуль упругости. Объяснение этого феномена приведено в работе [8]: хотя с точки зрения теории полимерные волокна не способны выполнять роль традиционных армирующих компонентов, поскольку бетон не в состоянии передать на них возникающее усилие, а сами волокна не могут

сдерживать деформации бетона при его нагружении, но применение низкомолекулярных, в частности, полипропиленовых волокон, в качестве армирующих компонентов, дисперсно распределяемых в объеме бетона, повышает вязкость разрушения бетона и в определенных условиях обеспечивает повышение его прочности при раскалывании, сжатии и изгибе. Обоснован данный эффект тем, что на стадии твердения и набора прочности модуль упругости волокон полипропилена выше до определенного момента в сравнении с модулем деформации твердеющей дисперсионной среды. В этом случае полимерные волокна способны выполнять функции армирующих компонентов, сдерживая температурно-усадочные деформации бетона и ограничивая возникновение трещин в его объеме. В контакте с низкомолекулярными волокнами снижается возможность возникновения избыточной концентрации напряжений в объеме твердеющей среды в сравнении с более жесткими включениями.

К тому же полимерное дисперсное армирование существенно повышает сопротивление бетона ударным нагрузкам. Это подтверждается экспериментом, проведенным американскими учеными [6]: в эпицентр взрыва были помещены конструкции, армированные стальной стержневой арматурой, а также конструкции с фибровым армированием (стальной фиброй, различными синтетическими волокнами, асбестовыми волокнами). Наименьшие повреждения имели элементы, дисперсно армированные нейлоновыми нитями. Такие элементы вполне могли быть восстановлены при реконструкции. Образцы, армированные только стержневой арматурой, были разрушены полностью.

В работе [6] эмпирическим путем установлено, что наибольшая эффективность полимерного фибрового армирования достигается при содержании синтетических волокон по массе 0,15–0,25 % (по объему 0,4–0,65 %) при длине волокон 10–100 мм. Эти рекомендации справедливы для бетонной матрицы на плотных заполнителях.

Полимерная фибра может быть представлена как добавка при неизменном соотношении Ц : П : Г(Щ), а может вводиться взамен заполнителя или цемента.

В работе [9] показано, что чем выше содержание полимерного волокна в теле бетона, тем более вязкой получается бетонная смесь. Это существенно снижает ее удобоукладываемость и негативно сказывается на прочностных и деформативных характеристиках

дисперсно армированного бетона. Полимерная фибра добавляется взамен цемента. Состав бетонной смеси: Ц : П : Г = 1 : 2 : 4. На основе испытания образцов в виде цилиндров установлено следующее: при содержании 2 % полимерной фибры и 98 % цемента по массе обеспечивает более высокую прочность при сжатии по сравнению с неармированным бетоном; содержание 6 % полимерной фибры и 94 % цемента по массе позволяет получить одинаковую прочность при сжатии для армированных и неармированных образцов.

Интересный вариант дисперсного армирования предложен в [10]: армирование полимерной фиброй может быть скомбинировано с армированием стальной фиброй. Максимальная эффективность комбинированного фибрового армирования достигается при общем содержании фибры 1 % по объему взамен крупного заполнителя, причем 10 % объема стальной фибры заменяется на полимерную.

В работе [11] приведены результаты экспериментального исследования работы легких бетонов, армированных углеродным волокном (длина волокна 5 мм, диаметр 10 мкм) с содержанием акрилового полимера. Состав бетона для опытных образцов: Ц : П : Г = 1 : 1,5 : 2 по объему. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что рекомендуемый расход углеродистой фибры для дисперсного армирования легких бетонов составляет 0,5 %, 1 % и 1,5 %. Добавление фибры улучшает прочностные и деформативные свойства легкого бетона, а вот добавление полимера совместно с углеродистой фиброй оказывается негативным: снижается прочность при сжатии, изгибе и раскалывании. Поэтому акриловые полимеры не рекомендуется применять для легких бетонов с содержанием полимерных волокон.

С целью подбора оптимального состава конструкционного керамзитобетона, дисперсно армированного полимерной фиброй, были проведены испытания серии образцов в виде кубов с размером ребра 100 мм. В качестве бетонной матрицы использовался керамзитобетон, изготовленный с применением белорусского сырья: керамзитовый гравий фракцией 10–20 мм, природный карьерный песок с модулем крупности  $M_{кр} = 1,8$ , портландцемент марки М500. Состав бетонной смеси: Ц : П : Г = 1 : 1,72 : 0,83, В/Ц = 0,49. Армирование осуществлялось полипропиленовой фиброй ВСМ с содержанием волокон 0,5 % по массе.

Полипропиленовая фибра – волокно строительное микроармирующее (ВСМ) – изготавливается из гранул высокомолекулярного термопластичного полимера путем структурной модификации. Это продукт российского производства, который является аналогом британской марки «Фибрин» (fibrin) компании «Adfil». Производится по ТУ 2272-006-13429727-2009 из полипропилена СЗН6. Технические характеристики ВСМ: длина волокна – 6 мм, 12 мм, 18 мм; диаметр волокна – 10–15 мкм; форма круглая; поверхность покрыта специальным составом, способствующим рассеиванию и сцеплению с цементным раствором; плотность – 0,91 г/см<sup>3</sup> при 20 °С; модуль упругости – 5,7 ГПа.

Образцы (дисперсно армированные и контрольные, без армирования) испытывались в возрасте 7 и 28 суток.

В результате испытаний было установлено, что дисперсное армирование полипропиленовой фиброй повышает прочность керамзитобетона при осевом сжатии на 22 % в возрасте 7 суток и на 19,5 % в возрасте 28 суток по сравнению с контрольными образцами (рис. 1.).

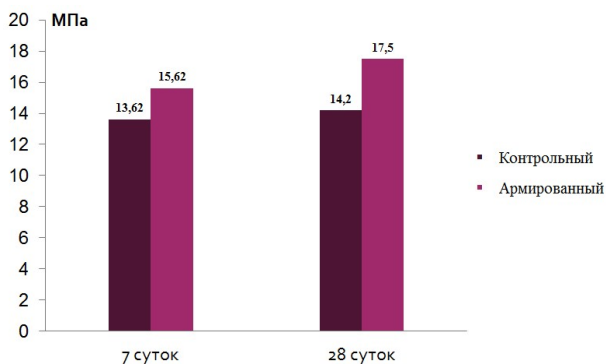


Рис. 1. Прочность на осевое сжатие керамзитобетонных образцов

**Выводы.** Использование армирующей полимерной фибры может быть более эффективным для легких бетонов, чем для тяжелых, поскольку легкие бетоны (в частности, керамзитобетон) имеют более высокие пределы микротрещинообразования по сравнению с бетонами на плотных заполнителях [12], а введение полимерной

фибры позволяет достичь еще более высоких значений пределов (нижнего и верхнего) образования микротрещин. Это означает, что применение дисперсно армированных легких бетонов перспективно при действии статических цикловых нагрузок, а также в условиях длительного нагружения.

Анализ результатов работы исследователей [1, 2, 6–9, 11] позволяет сделать вывод о том, что для получения конструкционных легких бетонов, армированных полимерными волокнами, содержание фибровых волокон не должно превышать 2 % по массе. Рекомендуемое содержание фибры 0,5–1,5 %. Этот параметр требует уточнения и проведения дальнейших экспериментальных исследований с целью разработки конкретных рекомендаций применительно к белорусским сырьевым материалам.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allen, H. G. Stiffness and strength of two glass-fiber reinforced cement laminates / H. G. Allen // *Journal of Composite Material*. – 2001. – Vol. 5. – Pp. 194–207.

2. Пустовгар А. П. Повышение эффективности дисперсного армирования бетонов / А. П. Пустовгар, С. А. Пашкевич, С. В. Нефедов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://concretezone.ru/stati/23-povyshenie-effektivnosti-dispersnogo-armirovaniya-betonov>.

3. Фибры для бетона. Часть 2. Полимерные волокна. Определения, технические требования и соответствие: СТБ EN 14889-2-2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск: Стройтехнорм, 2009. – 44 с.

4. Chandra, S. Lightweight aggregate concrete. Science, Technology, and Applications / Satish Chandra, Leif Berntsson. – Norwich, New York, U.S.A.: Noyes Publications / William Andrew Publishing, 2002. – 407 p.

5. Aveston J. Fiber reinforced materials. Practical Metallic Composites / J. Aveston. – Spring Meeting Palmy. – London, 1974. – S. 3. – No 1. – 76 p.

6. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: моногр. / Ф. Н. Рабинович. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 560 с.

7. Yoo-Jae Kim. Mechanical Properties of Fiber Reinforced Lightweight Concrete Containing Surfactant / Yoo-Jae Kim, Jiong Hu, Soon-Jae Lee, Byung-Hee You // *Advances in Civil Engineering*. – 2010. – Vol. 2010. – Article ID 549642. – 8 p. – Электронная публикация. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1155/2010/549642>.

8. Рабинович Ф. Н. Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона / Ф. Н. Рабинович, С. М. Баев // *Научно-технический и производственный журнал «Промышленное и гражданское строительство»*. – № 8. – 2009. – Электронная публикация. Режим доступа: <http://www.volokno.su/documentation/articles/effectiveness.html>.

9. Tomas, U. Influence of Polymer Fiber on Strength of Concrete / U. Tomas, Jr. Ganiron // *International Journal of Advanced Science and Technology*. – 2013. – Vol. 55. – Pp. 53–66.

10. Состав бетона с фибрами. – Электронная публикация. Режим доступа: <http://betonvtomske.ru/состав-бетона-с-фибрами>.