Строительные материалы и изделия

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-9>
УДК 691.327.333

Н.А. Белькова, М.П. Степанова, Д.Е. Курбаков, Г.Г. Супрунчик

БЕЛЬКОВА НАТАЛЬЯ АНАТОЛЬЕВНА – к.т.н., доцент, SPIN: 6502-2935,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3005-5956>, verlnata@mail.ru
СТЕПАНОВА МАРИЯ ПЕТРОВНА – к.т.н., доцент, SPIN: 5873-6018,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-4871>, ma035@yandex.ru
КУРБАКОВ ДМИТРИЙ ЕГОРОВИЧ – инженер Центра коллективного пользования
им. проф. Ю.М. Борисова, thefog@inbox.ru
СУПРУНЧИК ГРИГОРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ – магистрант, g.suprunchik@bk.ru
Воронежский государственный технический университет
Воронеж, Россия

Управление физико-механическими характеристиками неавтоклавно поризованного бетона путем его микроармирования

Аннотация: Улучшение качественных характеристик неавтоклавно поризованного бетона возможно за счет его микроармирования с помощью полимерного фиброволокна. В настоящей статье представлены авторские экспериментальные исследования оптимизации состава поризованного бетона по следующим критериям: длина (6 и 12 мм) и расход полимерного фиброволокна. Во время эксперимента, проведенного по стандартным методикам, были оценены свойства и структура полученного материала. Рассчитаны количественные данные о влиянии длины и расхода полиэфирного фиброволокна на показатели прочности, трещиностойкости и усадки поризованного бетона. С помощью микроскопического анализа установлено, что фиброволокно создает пространственную сетку, которая обеспечивает эффект микроармирования. Установлено, что оптимальный расход фиброволокна составляет 1–2 кг на кубический метр смеси, а основные эксплуатационные свойства полученного бетона соответствуют требованиям нормативной документации.

Ключевые слова: поризованный бетон, фиброволокно полиэфирное, усадка, трещиностойкость, прочность

Введение

В 2020 г. наблюдался рост интереса к материалам для индивидуального строительства. Последние исследования показывают, что рынок современных стеновых материалов представлен в равной степени блоками на основе ячеистого бетона и керамическими материалами (рис. 1) [4]. Ячеистые автоклавные бетоны давно зарекомендовали себя как эффективные стеновые материалы, обладающие достаточной прочностью, трещиностойкостью и низкими показателями теплопроводности. Однако и у них есть недостатки, основной – повышенные энергозатраты на производство.

Одна из альтернатив – неавтоклавно поризованный бетон, интерес к которому возобновился с 1990-х годов. С этого времени получены его новые вариации достаточного уровня качества [6, 11–16]. Применение таких видов бетонов особенно эффективно в монолитном строительстве за счет мобильности технологии (нет необходимости в создании сложной производственной базы), возможности твердения бетона непосредственно в конструкции

© Белькова Н.А., Степанова М.П., Курбаков Д.Е., Супрунчик Г.Г., 2021

Статья: поступила: 14.04.2021; рецензия: 19.04.2021; финансирование: Воронежский государственный технический университет.

и доступности сырьевых материалов [12, 17]. Для возведения несущих и самонесущих конструкций зданий рекомендуется использование поризованного бетона средней плотности 1200–1600 кг/м³, а для ограждающих конструкций – двухслойное исполнение из бетона плотностью 800–1000 кг/м³ в сочетании с эффективными утеплителями.

Рис. 1. Рынок стеновых материалов в России в 2020 г.

Одни из препятствий на пути широкого использования поризованного бетона – его пониженная трещиностойкость и повышенная усадка. Для решения этой проблемы было проведено довольно много исследований [1, 2, 5, 8, 10].

Предпринятый нами обзор источников позволяет сделать вывод: для повышения качества неавтоклавных пенобетонов наиболее эффективными являются приемы многоуровневого армирования и применение микронаполнителей различного вида. Для нас интерес представляет способ многоуровневого армирования структуры поризованного бетона: на микроуровне структуры – путем выращивания кристаллов игольчатой формы, на мезо- и макроуровне – путем введения фиброволокна различного типа.

Вопросы формирования микроармирующего каркаса решались в работах [3, 5, 7, 10]. В частности, в [5] показано, что введение добавки РСАМ достаточно эффективно компенсирует усадку за счет блочно-игольчатой структуры в перегородках, которая оказывает сопротивление усадочным явлениям пеноцементного каркаса во время твердения.

Исследования (см., например, [10]) показали, что введение полимерного фиброволокна различного вида увеличивает показатели прочности при сжатии поризованного бетона. Что касается влияния длины фиброволокна, то в [7] установлено, что в фибропенобетонах при содержании фибры около 2% от объема твердой фазы прочность как бетона, так и сцепления стержневой арматуры периодического профиля возрастает. Так, повышение длины фибры от 12 до 40 мм обеспечивает прирост прочности.

Несмотря на достаточно большой объем исследований, посвященных получению микроармированного поризованного бетона, отсутствуют конкретные данные влияния длины и расхода фибры на технические свойства (прочность, трещиностойкость, усадку) и структуру полученного композита.

Цель данной статьи – установить влияние длины и расхода полимерного фиброволокна на прочность при сжатии и изгибе, трещиностойкость и структуру поризованного цементного бетона.

Для этого нам необходимо решить следующие задачи:

- 1) экспериментально исследовать влияние длины и расхода полимерного фиброволокна на свойства поризованного цементного бетона;
- 2) изучить влияние длины и расхода полимерного фиброволокна на структуру поризованного цементного бетона.

Материалы и методы исследований

Эксперименты проводились на базе Воронежского государственного университета в 2020 г. на научном оборудовании Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова. Для всех видов поризованного бетона был взят состав с соотношением по массе цемента (Ц), песка (П) и воды (В) – Ц:П:В=1:1:0,5. Плотность смеси соответствовала классу по плотности D800.

В опытах использовались: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, песок местного карьера с модулем крупности $M_{кр} = 1,6–1,7$. В качестве добавки применялась воздухововлекающая добавка «Пеностром», а в качестве армирующей добавки – фиброволокно марки Fibra № 1 (изготовитель ООО «ИНКОМСТРОЙ») с характеристиками, приведенными в таблице.

Характеристики полиэфирного фиброволокна

Показатели	Значение
Толщина волокон, мкм	6–9
Прочность на разрыв, МПа	3200–3500
Модуль упругости, МПа	58000–63000
Удлинение, %	30–34
Плотность, г/см ³	1,36–1,38
Стойкость к щелочной среде бетона	Очень высокая
Температура плавления, °С	300
Длина волокна, мм	6; 12

Приготовление пенобетонной смеси производилось в смесителе турбинного типа, скорость перемешивания составляла 900 об/мин, его продолжительность – 4 мин. Введение фиброволокна осуществлялось на этапе приготовления пены. После приготовления контролировалась плотность пенобетонной смеси, затем производилось формование образцов для испытаний заданных групп свойств.

Для всех видов бетона оценивались: прочность при сжатии, прочность при изгибе, влажностная усадка, показатель трещиностойкости. Определение перечисленных характеристик производилось по стандартным методикам, регламентированным для ячеистых бетонов (ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 27005-2014, ГОСТ 25485-2019). Прочностные характеристики образцов поризованного бетона оценивались через 28 сут их твердения в нормальных температурно-влажностных условиях. Трещиностойкость бетона оценивалась по коэффициенту интенсивности напряжений (критерий пропорциональности напряжений, обуславливающий начало развития трещины).

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе исследований оценивалось влияние расхода и длины фиброволокна на технические свойства поризованного бетона.

Как иллюстрирует рис. 2, введение фиброволокна повышает прочность при сжатии с 3,7 до 5,0 МПа, при этом длина фиброволокна практически не влияет на прочность при сжатии поризованного бетона. Повышение расхода фиброволокна приводит к более значительному повышению прочности поризованного бетона. Так, прочность при сжатии для расхода 1 кг на 1 м³ составляет 3,8 МПа, а для расхода 4 кг на 1 м³ – около 5 МПа.

Наибольший положительный эффект от введения фиброволокна получен для показателя прочности при изгибе (рис. 3).

Общий прирост прочности произошёл с 0,6 до 1,2 МПа для фиброволокна любой длины. При увеличении расхода фиброволокна длиной 6 мм до 2 кг/м³ наблюдается резкий скачок прочности при изгибе бетона, но в дальнейшем увеличение расхода фибры практически не влияло на

этот показатель. Таким образом, оптимальный расход фиброволокна длиной 6 мм составляет 2 кг/м^3 . При длине фиброволокна 12 мм и при низких его расходах (до 2 кг/м^3) прочность при изгибе повышается примерно в 1,5 раза. И только при расходе 5 кг/м^3 она достигает значений, соответствующих поризованному бетону с фиброволокном длиной 6 мм. Такая разница в показателях прочности на изгиб объясняется большим количеством отдельных волокон длиной 6 мм в единице объема, которые и создают армирующий эффект в структуре поризованного бетона.

Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии поризованного бетона от длины и расхода полиэфирного волокна

Рис. 3. Зависимость прочности поризованного бетона при изгибе от длины и расхода полиэфирного фиброволокна

На рис. 4 представлены зависимости критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} от длины и расхода фиброволокна.

Как показывают полученные данные, введение фиброволокна любой длины значительно повышает показатель коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} : он возрастает с 68 до $92 \text{ кН/м}^{3/2}$ для поризованного бетона с фиброволокном длиной 6 мм до $107 \text{ кН/м}^{3/2}$ – для поризованного бетона с фиброволокном длиной 12 мм. При этом для фиброволокна длиной 6 мм снова наблюдается оптимум по расходу в $1\text{--}2 \text{ кг/м}^3$, превышение которого практически не влияет на показатель коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} . А для фибры длиной 12 мм наблюдается постепенное повышение коэффициента с повышением расхода фиброволокна практически в два раза по сравнению с эталоном.

Рис. 4. Зависимость критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} поризованного бетона от длины и расхода полиэфирного фиброволокна

На рис. 5 представлены данные по значениям полной влажностной усадки модифицированного фиброволокном поризованного бетона. Введение фиброволокна приводит к постепенному снижению величины полной усадки с 3,5 до 2,5 мм/м. Длина фиброволокна практически не влияет на этот показатель.

Рис. 5. Величина полной усадки поризованного бетона с фиброволокном

Такие положительные изменения в показателях технических характеристик поризованного бетона можно объяснить армирующим эффектом фиброволокна, которое создает пространственную сетку. Этот тезис был подтвержден нашими исследованиями влияния длины и расхода фиброволокна на структуру поризованного бетона (рис. 6).

При расходе фиброволокна 1 кг на 1 м³ наблюдается армирование отдельных пор волокнами любой длины. Увеличение расхода фиброволокна до 3 кг/м³ приводит к созданию объемной армирующей сетки. При этом при длине 6 мм фиброволокна соединяют (армируют) поры относительно небольшого (до 2 мм) диаметра, а при длине 12 мм – уже более крупные поры. Наконец, при увеличении количества фибры до 4–5 кг/м³ происходит образование «ежей» – сплетений волокон, которые и упрочняют структуру поризованного бетона. Наиболее ярко это проявляется при длине волокна 6 мм: из-за большого количества фибры и неравномерного ее распределения в смеси. Для фиброволокна длиной 12 мм наблюдаются отдельные участки с большим скоплением волокон, и в то же время есть участки, где фиброволокно практически отсутствует. Наилучшая структура формируется при введении

полиэфирного фиброволокна длиной 6 мм, она и обеспечивает более стабильное улучшение качества поризованного бетона при расходе до 3 кг/м^3 смеси. Подобный микроармирующий эффект подтвержден и исследованиями [9], согласно которым, микроармирование ячеистых композитов за счет введения фиброволокон позволяет снизить усадочные деформации, интенсифицировать процессы твердения, за счет чего и повышается качество поверхности изделий.

Рис. 6. Микрофотографии структуры поризованного бетона для различных расходов (увеличение 200 раз): а – эталон; б – 1 кг/м^3 ; в – 2 кг/м^3 ; г – 4 кг/м^3 ; д – 5 кг/м^3

Заключение

Итак, проведенные нами исследования подтвердили возможность улучшения качества неавтоклавного цементного поризованного бетона путем введения в его состав полиэфирного фиброволокна.

Установлено, что введение фиброволокна любой длины улучшает технические характеристики поризованного цементного бетона: прочность при изгибе, показатели трещиностойкости и усадки. Оптимальные расходы фиброволокна находятся в пределах 1–2 кг/м³ смеси. Предложенный состав поризованного фибробетона может быть рекомендован к использованию для возведения как несущих, так и ограждающих конструкций зданий.

В дальнейшем нам необходимо определить оптимум по параметрам длины и расхода фиброволокна методом активного планирования эксперимента для поризованного бетона различной плотности, дополнив исследования оценкой показателя ударной прочности (вязкости разрушения), кроме того, более детально оценить влияние фиброволокна на структуру поризованного фибробетона. Также необходимо разработать детальные рекомендации по применению поризованных бетонов различной плотности.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афашагова Я.З. Обоснование рецептурно-технологических факторов повышения качества цементного пенобетона // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2015. № 3(113). С. 84–85.
2. Баранова А.А. Пенобетон, модифицированный микрокремнеземом ЗАО «Кремний» // Вестник ИрГТУ. 2014. № 8(91). С. 78–79.
3. Кадомцева Е.В., Моргун Л.В., Богатина А.Ю. О поведении фибропенобетона при изгибе армированных балок // Бетон и железобетон – взгляд в будущее. Труды III Всероссийской (II Международной) конф. по бетону и железобетону. М., 2014. С. 151–157.
4. Космодемьянов В.А., Фартыгин М.Р., Скаяев А.Р. Анализ рынка России на предмет использования ячеистого бетона в малоэтажном строительстве // Перспективы науки. 2019. № 7(118). С. 120–123.
5. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Шукин Г.Л., Беланович А.Л., Карпушенков С.А., Савенко В.П. Компенсация усадки пенобетона // Строительные материалы. 2015. № 3. С. 3–7.
6. Моргун Л.В. Теоретическое обоснование и экспериментальная разработка технологии высокопрочных фибропенобетонов // Строительные материалы. 2005. № 6. С. 59–64.
7. Моргун Л.В., Виснап А.В., Моргун В.Н. Влияние расхода и длины фибры на эффективность сцепления стеклопластиковой арматуры с фибропенобетоном // Научный вестник Воронежского гос. архитектурно-строительного ун-та. Сер. Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2016. № 2(13). С. 25–29.
8. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Богатина А.Ю. Влияние формы сырьевых компонентов на структуру пенобетонов // Химия, физика и механика материалов. 2018. № 4(19). С. 15–28.
9. Павленко Н.В., Капуста М.Н., Мирошников Е.В. Особенности армирования ячеистых бетонов неавтоклавного твердения на основе наноструктурированного вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 33–36.
10. Палалане Ж.А., Бурдюгов А.В., Шахова Л.Д. Армирование и микроармирование пенобетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. № 2. С. 20–24.
11. Пухаренко Ю.В. Прочность и долговечность ячеистого фибробетона // Строительные материалы. 2004. № 12. С. 40–41.
12. Славчева Г.С., Котова К.С., Афашагова Я.З. Перспективы применения неавтоклавных цементных поризованных бетонов в современном строительстве // Вестник ОН РААСН. [Белгород]. 2014. Вып. 13. С. 211–217.
13. Удачкин И.Б. Ключевые проблемы развития производства пенобетона // Строительные материалы. 2002. № 3. С. 8–9.

14. Ухова Т.А. Ресурсосберегающие технологии производства изделий из неавтоклавных ячеистых бетонов // Бетон и железобетон. 1993. № 12. С. 18.
15. Шубин И.Л., Умнякова Н.П., Ярмаковский В.Н. Особо легкие бетоны новых модификаций – для решения задач ресурсоэнергосбережения. В защиту отечественных технологий // Технологии строительства. 2012. № 4. С. 42.
16. Fathiah M.Z., Edyvean R.G. The Role of Ionic Strength and Mineral Size to Zeta-Potential for the Adhesion of *P. putida* to Mineral Surfaces. (World Academy of Science, Engineering and Technology). Intern. J. of Biotechnology and Bioengineering. 2015; 9(7):805–810.
17. Sandan A.S., Kysydak A.S. Using fine aggregate to improve concrete properties. Components of Scientific and Technological Progress. 2018;4(38):20–22.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 2/47

Building Materials and Products

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-9>

Belkova N., Stepanova M., Kurbaev D., Suprunchik G.

NATALIA BELKOVA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

(Corresponding Author), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3005-5956>, verlnata@mail.ru

MARIYA STEPANOVA, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-4871>, max035@ya.ru

DMITRII KURBAEV, Engineer of the Collective Use Center named after Prof.

Yu.M. Borisov, thefog@inbox.ru

GRIGORII SUPRUNCHIK, MS-Student, g.suprunchik@bk.ru

Voronezh State Technical University

Voronezh, Russia

Control of physical and mechanical characteristics of non-autoclave cement porous concrete with micro-reinforcement method

Abstract: Improvement of quality characteristics of non-autoclave cement porous concrete is possible with its micro-reinforcement using polymer fiber. This article presents the author's experimental studies of optimizing the composition of porous concrete according to the following criteria: length (6 and 12 mm) and consumption of polymer fiber. During the experiment conducted according to standard procedures, the properties and structure of the obtained material were evaluated. Quantitative data was obtained on the effect of polyester fiber length and consumption on the strength of crack resistance and shrinkage of porous concrete. Using microscopic analysis, it was found that fibrous fiber creates a spatial mesh that provides micro-reinforcement effect. It was found out that the optimal fiber consumption is 1–2 kg per cubic meter of the mixture, and the main operational properties of the obtained concrete comply with the requirements of regulatory documentation.

Keywords: porous concrete, fibrous polyester, shrinkage, crack resistance, strength

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. Afashagova Ya.Z. Substantiation of recipe and technological factors for improving the quality of cement foam concrete. Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2015(113):84–85.
2. Baranova A.A. Penobeton, modified by the microcrin of CJSC *Silicon*. Bulletin of IrGTU (Irkutsk). 2014(91):78–79.
3. Kadomtseva E.V., Morgun L.V., Bogatina A.Yu. On the behavior of fibropene concrete in bending reinforced beams. Concrete and Reinforced Concrete – a look into the future. Works of the III All-

- Russian (II International) Conf. on concrete and reinforced concrete. M., 2014, p. 151–157.
4. Cosmodemyanov V.A., Fartygin M.R., Skyaev A.R. Analysis of the Russian market for the use of cellular concrete in low-rise construction. *Science Prospects*. 2019(118):120–123.
5. Leonovich S.N., Sviridov D.V., Schukin G.L., Belanovich A.L., Karpushenkov S.A., Savenko V.P. Foam concrete shrinkage compensation. *Construction Materials*. 2015(3):3–7.
6. Morgun L.V. Theoretical justification and experimental development of high-strength fibropene concrete technology. *Building Materials*. 2005(6):59–64.
7. Morgun L.V., Visnap A.V., Morgun V.N. The effect of fiber consumption and length on the efficiency of adhesion of fiberglass reinforcement with fibropene concrete. *Scientific Bulletin of the Voronezh State Univ. of Architecture and Construction. Series Physicochemical Problems and High Technologies of Construction Materials Science*. 2016(13):25–29.
8. Morgun V.N., Morgun L.V., Bogatina A.Yu. Influence of the shape of raw materials on the structure of foam concrete. *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2018(19):15–28.
9. Pavlenko N.V., Kapusta M.N., Miroshnikov E.V. Features of reinforcement of cellular concretes of non-autoclave hardening based on nanostructured binder. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013(1):33–36.
10. Palalane Zh.A., Burdyugov A.V., Shakhova L.D. Reinforcement and microarmament of foam concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2009(2):20–24.
11. Pukharens Yu.V. Strength and durability of cellular fibrous concrete. *Construction Materials*. 2004(12):40–41.
12. Slavcheva G.S., Kotova K.S., Afashagova Y.Z. Prospects for the use of non-autoclave cement porous concrete in modern construction. *Bulletin OSN RAASN. Belgorod*. 2014(13):211–217.
13. Udachkin I.B. Key problems of foam concrete production development. *Construction Materials*. 2002(3):8–9.
14. Ukhova T.A. Resource-saving technologies for the production of products from non-autoclave cellular concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1993(12):18.
15. Shubin I.L., Umnyakova N.P., Yarmakovskiy V.N. Particularly light concretes of new modifications – for solving resource-energy saving problems. In defense of domestic technologies. *Construction Technologies*. 2012(4):42.
16. Fathiah M.Z., Edyvean R.G. The Role of Ionic Strength and Mineral Size to Zeta-Potential for the Adhesion of *P. putida* to Mineral Surfaces. (World Academy of Science, Engineering and Technology). *Intern. J. of Biotechnology and Bioengineering*. 2015; 9(7):805–810.
17. Sandan A.S., Kysydak A.S. Using fine aggregate to improve concrete properties. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2018;4(38):20–22.