ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ БЕТОН

© А. А. Пыкин, Н. П. Лукутцова, С. Н. Головин, И. В. Моськина

Брянский государственный инженерно-технологический университет, г. Брянск, Россия

Разработан состав, исследованы свойства и микроструктура дисперсно-армированного полистиролбетона для изготовления мелкоштучных конструкционно-теплоизоляционных стеновых изделий, включающий портландцемент, гранулированный вспененный полистирол, базальтовую фибру, воду и кремнеземсодержащий модификатор, получаемый смешиванием конденсированного микрокремнезема, суперпластификатора С-3 и водного раствора жидкого натриевого стекла. Разработанный дисперсно-армированный полистиролбетон с добавкой кремнеземсодержащего модификатора характеризуется повышенными значениями адгезионной прочности (0,231 МПа), класса по прочности на растяжение при изгибе ($B_{\text{ф}}4$), класса по прочности на сжатие (В5), коэффициента трещиностойкости (0,77), марки по морозостойкости ($F_{\text{т}}200$) при незначительном увеличении средней плотности и коэффициента теплопроводности. Повышение физико-механических свойств и морозостойкости полистиролбетона разработанного состава достигается в результате уплотнения и упрочнения цементного камня, улучшения его сцепления с пенополистиролом за счет синергетического эффекта действия кремнеземсодержащего модификатора, как адгезионной и структурообразующей добавки, и базальтовой фибры, как дисперсно-армирующего компонента.

Ключевые слова: полистиролбетон, дисперсное армирование, базальтовая фибра, кремнеземсодержащий модификатор, физико-механические свойства, морозостойкость.

Полистиролбетон (ПСБ) на основе цементного вяжущего представляет собой сложную систему, в которой полярная жидкость (вода) не смачивает гидрофобную поверхность заполнителя – гранулированного вспененного полистирола (пенополистирола). В связи с этим основным недостатком ПСБ является низкая адгезионная прочность в зоне контакта пенополистирола с цементным камнем (ЦК). Это приводит к выкрашиванию пенополистирола из бетона, что сопровождается снижением прочности, трещиностойкости, морозостойкости, экологической безопасности ПСБ [10].

Обзорный анализ выполненных исследований показывает, что к наиболее эффективному способу создания прочных адгезионных связей в системе «пенополистирол – цементный камень» относится структурирование ЦК химически родственными органоминеральными микро- и наномодификаторами [9, 17] на основе природного и техногенного сырья [8, 11, 13, 18], способствующими образованию

адсорбционных промежуточных слоев в зоне контакта гидрофобного пенополистирола с гидрофильными продуктами гидратации клинкерных минералов [2], при дисперсном армировании бетона макро-, микро- и нановолокнами [3].

Концепция многоуровневого дисперсного армирования сопровождается синергетическим эффектом действия армирующих элементов на каждом масштабном структурном уровне бетона, что позволяет увеличить сопротивление бетона хрупкому разрушению [4].

В данной области исследований большой научно-практический интерес представляют минеральные волокна из базальтовых [7], хризотил-асбестовых [6], волластонитовых [12], диосидовых и других горных пород, а также углеродные [5], галлуазитовые [14] и биосилифицированные нанотрубки [15], микрокристаллическая целлюлоза [16] и древесные опилки [1].

Целью работы является разработка состава, исследование свойств и микроструктуры

дисперсно-армированного полистиролбетона с добавкой кремнеземсодержащего модификатора для изготовления мелкоштучных конструкционно-теплоизоляционных стеновых изделий с повышенными физико-механическими характеристиками и морозостойкостью.

В качестве исходных компонентов для получения образцов ПСБ применялись:

- бездобавочный нормальноотверждающий портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н (АО «Мальцовский портландцемент», Брянская область, Россия);

- пенополистирол марки ПВГ 15 с диаметром гранул 2,5-5 мм, насыпной плотностью 12 кг/м³ (ООО «ЕПС-Самара», Самара, Россия);

- базальтовая фибра с длиной волокна 1,5-4,5 мм, диаметром 7,5-10,5 мкм (ОАО «Ивотстекло», Брянская область, Россия);

- кремнеземсодержащий модификатор в виде пасты, получаемой смешиванием конденсированного микрокремнезема марки МК-85 (ООО «Альянс-Строительные Технологии», Московская область, Россия) с суперпластификатором С-3 (ОАО «Полипласт», Тульская область, Россия), жидким натриевым стеклом плотностью 1380-1420 кг/м³, силикатным модулем 2,9-3,1 (ООО «Меттерра», Челябинск, Россия) и водой;

- вода затворения.

Приготовление полистиролбетонных смесей (таблица 1) осуществлялось путем смешивания исходных компонентов в роторном смесителе принудительного действия в три стадии: кремнеземсодержащий модификатор – пенополистирол (первая стадия); базальтовая фибра – 1/3 часть воды (вторая стадия); портландцемент – 2/3 части воды (третья стадия).

Для определения эффективности действия базальтовой фибры и кремнеземсодержащего модификатора на физико-механические свойства (среднюю плотность, коэффициент теплопроводности, адгезионную прочность, прочность на растяжение при изгибе, прочность на сжатие, коэффициент трещиностойкости) и морозостойкость ПСБ применялись комплексные методы в соответствии с ГОСТ 33929. Испытаниям подвергались образцы ПСБ, изготовленные способом объемного вибропрессования, через 28 суток их нормального твердения и последующего высушивания до постоянной массы при температуре 70 °С.

Средняя плотность, коэффициент теплопроводности, прочность на сжатие ПСБ определялись на образцах-кубах размерами 10×10×10 см, прочность на растяжение при изгибе – на образцах-балочках размерами 4×4×16 см. За показатель трещиностойкости принимался условный коэффициент, равный отношению прочности на растяжение при изгибе к прочности на сжатие.

Адгезионная прочность оценивалась путем испытания на сдвиг образцов прямоугольной формы из пенополистирола размерами 10×10 см, на поверхность которых сначала наносился и выдерживался слой кремнеземсодержащего модификатора (отдельно и совместно с базальтовой фиброй), а затем слой цементного теста толщиной 10 мм.

Морозостойкость ПСБ определялась по снижению прочности на сжатие и потере массы образцов после заданного числа циклов их многократного попеременного замораживания и оттаивания при следующих условиях: среда насыщения – вода; среда и температура замораживания – воздушная, минус (18 ± 2)

Таблица 1 – Составы полистиролбетонных смесей

№	Состав, % по массе				
	портландцемент	пенополистирол	кремнеземсодержащий модификатор	базальтовая фибра	вода
1	70,8	6,3	-	-	22,9
2	68	6	0,2	3,8	22
3	70,8	6,3	0,2	-	22,7

Таблица 2 – Физико-механические свойства полистиролбетона

Показатели свойств	Значение		
	состав № 1	состав № 2	состав № 3
Средняя плотность, кг/м ³	430	452	443
Марка по средней плотности	D400	D450	D400
Коэффициент теплопроводности, Вт/ (м·°C)	0,125	0,136	0,131
Адгезионная прочность, МПа	0,042	0,231	0,093
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	0,9	5	3,7
Класс по прочности на растяжение при изгибе	B _{tb} 0,8	B _{tb} 4	B _{tb} 2,8
Прочность на сжатие, МПа	2,7	6,5	7,7
Класс по прочности на сжатие	B2	B5	B7,5
Коэффициент трещиностойкости	0,33	0,77	0,48
Марка по морозостойкости:	F ₁ 50	F ₁ 200	F ₁ 100
снижение прочности на сжатие, %	14,6	14,1	13,8
потеря массы, %	4,5	4,8	4,7

Рис. 1. Изменение прочности на сжатие ПСБ с базальтовой фиброй и кремнеземсодержащим модификатором в условиях попеременного замораживания и оттаивания

°C; среда и температура оттаивания – вода, (20 ± 2) °C.

Анализ влияния базальтовой фибры и кремнеземсодержащего модификатора на изменение микроструктуры ПСБ проводился методом электронной микроскопии на растровом микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU.

Установлено, что, по сравнению с контрольным составом (состав №1, таблица 1), разработанный состав полистиролбетона с базальтовой фиброй и кремнеземсодержащим модификатором (состав №2, таблица 1) позволяет, при незначительном увеличении средней плотности (на 5%) и коэффициента тепло-

Модифицированный ПСБ без базальтовой фибры (состав №3, таблица 1), имея более высокий класс по прочности на сжатие (В7,5),

Результаты испытания на морозостойкость (рис. 1, 2) показали, что при увеличении числа циклов попеременного замораживания и оттаивания до 50 относительное снижение прочности на сжатие ПСБс базальтовой фи-

Рис. 4. Микроструктура дисперсно-армированного ПСБ без кремнеземсодержащего модификатора в зоне контакта цементного камня с базальтовой фиброй:
а – увеличение в 5000 раз; б – увеличение в 10000 раз

брой и кремнеземсодержащим модификатором составляет 4,4%, а относительная потеря массы – 2,7%.

Последующее поэтапное увеличение циклов попеременного замораживания и оттаивания от 50 до 300 приводит к повышению относительного снижения прочности на сжатие ПСБ от 4,4 до 17,8% (в 4 раза), а относитель-

ной потери массы – от 2,7 до 6,2% (в 2,3 раза).

Из полученных результатов следует, что марка по морозостойкости ПСБ с базальтовой фиброй и кремнеземсодержащим модификатором равна F_{1200} и удовлетворяет требованиям ГОСТ 10060: потеря прочности на сжатие составляет 14,1% (менее 15%), а массы – 4,8% (менее 5%).

Рис. 5. Микроструктура дисперсно-армированного ПСБ с кремнеземсодержащим модификатором в зоне контакта цементного камня с базальтовой фиброй:
а – увеличение в 5000 раз; б – увеличение в 10000 раз

Рис. 6. Микроструктура новообразований на поверхности базальтовой фибры в микроструктуре дисперсно-армированного ПСБ с кремнеземсодержащим модификатором (увеличение в 35000 раз)

Методом электронно-микроскопического анализа выявлено, что дисперсно-армированный ПСБ без кремнеземсодержащего модификатора характеризуется разуплотненной, рыхлой и дефектной микроструктурой с практически полным отсутствием новообразований на поверхности базальтовой фибры после непосредственного контакта с продуктами гидратации портландцемента (рис. 3).

При введении базальтового волокна отдельно от кремнеземсодержащего модификатора ухудшается сцепление цементного камня как с пенополистиролом, так и с фиброй (рис. 4).

В присутствии кремнеземсодержащего модификатора на поверхности базальтовой фибры образуется плотная оболочка, состоящая из продуктов взаимодействия минералов портландцементного клинкера и компонентов модификатора (в частности частиц микрокремнезема), что способствует улучшению сцепления базальтового волокна с цементным камнем (рис. 5). При этом микроструктура новообразований на поверхности базальтовой фибры является кубической, короткопризматической и пластинчатой, представлена кристаллогидратами, идентичными гидросиликатам кальция и этtringиту (рис. 6).

Таким образом, в ходе проведения исследований разработан состав и определены свойства дисперсно-армированного полистиролбетона с использованием базальтовой фибры и кремнеземсодержащего модификатора в виде пасты на основе микрокремнезема, суперпластификатора С-3 и водного раствора жидкого натриевого стекла.

Установлено, что кремнеземсодержащий модификатор способствует формированию на поверхности базальтовой фибры оболочки из продуктов взаимодействия минералов портландцементного клинкера и компонентов модификатора, идентичных гидросиликатам кальция и этtringиту, которая приводит к улучшению сцепления базальтового волокна с цементным камнем и, как следствие, повышению прочности и трещиностойкости полистиролбетона.

Разработанный состав полистиролбетона позволит изготавливать мелкоштучные конструктивно-теплоизоляционные стеновые изделия с маркой по средней плотности D450, коэффициентом теплопроводности до 0,136 Вт/(м·°C), классами по прочности на растяжение при изгибе и на сжатие B_с4 и B5 соответственно, коэффициентом трещиностойкости до 0,77, маркой по морозостойкости до F₁200.

ЛИТЕРАТУРА

1. Древесно-цементные композиции с модифицированной структурой на макро-, микро- и наноуровнях / Е.Ю. Горностаева, И.А. Ласман, Е.А. Федоренко, Е.В. Камоза // Строительные материалы. 2015. № 11. С. 13-16.
2. Конструкционно-теплоизоляционный полистиролбетон на основе регенерированного сырья / О.В. Журба, Е.Г. Шукина, Н.В. Архинчеева, М.Е. Заяханов, Э.А. Щукин // Строительные материалы. 2007. № 3. С. 50-54.
3. Комбинированное дисперсное армирование мелкозернистого бетона на техногенном сырье и нанодисперсном модификаторе / С.В. Ключев, Р.В. Лесовик, О.В. Казлитина, А.В. Нетребенко, Н.В. Калашников, А.А. Митрохин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 47-53.
4. Коротких Д.Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 96-99.
5. Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном / К.А. Сарайкина, В.А. Голубев, Г.И. Яковлев, С.А. Сеньков, А.И. Политаева // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 34-38.
6. Применение хризотилового волокна для дисперсного армирования строительных растворов / В.С. Семенов, Т.А. Розовская, А.Ю. Губский, Р.Р. Гареева // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2016. № 7. С. 93-97.
7. Мелкозернистый базальтофибробетон с нанокремнеземом / Л.А. Урханова, С.А. Лхасаранов, В.Е. Розина, С.Л. Буянтүев // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 45-48.
8. Cementconcretecomposites on the basis of by-passed stone and stone milling wastes / D. K.-S. Batayev, S.-A. Murtazaev, M. S. Saidumov, M. Sh. Salamanova, S. A. Aliev // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). 2016. Vol. 61 (4B). Pp. 327-336.
9. Evelson L., Lukutsova N. Some practical aspects of fractal simulation of structure of nanomodified concrete / International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10 (19). Pp. 40454-40456.
10. Environmental Hazard of Some Types of Expanded Polystyrene / R. Fediuk, A. Pak, V. Ginevskiy, N. Stoyushko, N. Gladkova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 115 (1). 012007.
11. Nature raw materials of Russian Primorsky Krai for concrete / R. S. Fediuk, Y. G. Yevdokimova, A. K. Smoliakov, R. A. Timokhin, N. Y. Stoyushko, V. O. Batarshin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 87 (5). 052005.
12. Effective Fine-Grained Concrete with High-Dispersed Additive Based on the Natural Mineral Wollastonite / E. G. Karpikov, N. P. Lukutsova, E. A. Bondarenko, V. V. Klyonov, A. E. Zajcev // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 85-90.
13. Composite binders on the basis of pearlite raw material of Transbaikalia / V.S. Lesovik, L. A. Urkhanova, A. M. Gridchin, S. A. Lkhasaranov // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9 (12). pp. 1016-1020.
14. The Dependence of the Aggregate Stability to Concrete of Modifying Additives Based on Halloysite Nanotubes in Water Environment on the Character of the Stabilizer / N. P. Lukutsova, I. A. Kulesh, S. N. Golovin, S. A. Andrushin // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 287-292.
15. Lukutsova N., Ustinov A. Concrete modified by additive based on biosilicated nanotubes // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10 (19). Pp. 40457-40460.
16. Lightweight Concrete Based on Gypseous Binding Materials, Modified with Microcrystalline Cellulose, and Cavitationly Processed Sawdust / A. A. Pykin, E. Y. Gornostaeva, N. P. Lukutsova, J. S. Pykina // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 188-192.
17. Influence of the inorganic modifier structure on structural composite properties / A. A. Volodchenko, V. S. Lesovik, L. H. Zagorodnjuk, A. N. Volodchenko // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10 (19). pp. 40617-40622.
18. Sand-clay raw materials for silicate materials production / A. N. Volodchenko, N. P. Lukutsova, E. O. Prasolova, V. S. Lesovik, A. A. Kuprina // Advances in Environmental Biology. 2014. Vol. 9 (12). Pp. 1087-1090.

DISPERSE-REINFORCED CONCRETE

©A. A. Pykin, N. P. Lukuttsova, S. N. Golovin, I. V. Moskina

Bryansk State Engineering Technological University, Bryansk, Russia

The composition of disperse-reinforced polystyrene concrete for the manufacture of small-pieces load-bearing structural insulating wall products is developed. Its properties and microstructure are studied. It is composed of Portland cement, granular foamed polystyrene, basalt fibre, water and silica-containing modifier obtained by mixing condensed silica, superplasticizer S-3 and an aqueous solution of sodium water glass. The developed disperse-reinforced polystyrene concrete modified by silica-containing additive is characterized by higher values of adhesive strength (0.231 MPa), class by bending tension strength (Btb4), class by compressive strength (B5), cracking resistance coefficient (0.77), grade by frost-resistance (F,200) with a slight increase in the average density and thermal conductivity coefficient. The increase of physical and mechanical properties and frost resistance of polystyrene concrete of the developed composition is achieved by compaction and hardening of cement stone, improving its adhesion to granular foamed polystyrene due to the synergistic effect of a silica-containing modifier acting as an adhesive and structure-forming additive, and basalt fibre as a disperse-reinforcing component.

Keywords: polystyreneconcrete, dispersedreinforcement, basaltfibre, silica-containingmodifier, physicalandmechanicalproperties, frostresistance.

REFERENCES

1. Gornostaeva, E. Yu., Lasman, I. A., Fedorenko, E. A. and Kamoza E. V. (2015) 'Drevesno-tsementnye kompozitsii s modifitsirovannoi strukturoi na makro-, mikro- i nanourovnyakh' // *Stroitel'nye materialy*. [Wood-cement compositions with a modified structure at the macro, micro and nanoscale // *Building materials*.]. № 11. Pp. 13-16.
2. Zhurba, O. V., Shchukina, E. G., Arkhincheeva, N. V., Zayakhanov, M. E. and Shchukin, E. A. (2007) 'Konstruktsionno-teploizolyatsionnyi polistirolbeton na osnove regenerirovannogo syr'ya' // *Stroitel'nye materialy*. [Structural and heat-insulating polystyrene concrete based on regenerated raw materials / *Building materials*.] № 3. Pp. 50-54.
3. Klyuev, S. V., Lesovik, R. V., Kazlitina, O. V., Ntrebenko, A. V., Kalashnikov N. V. and Mitrokhin A. A. (2014) 'Kombinirovannoe dispersnoe armirovanie melkozernistogo betona na tekhnogennom syr'e i nanodispersnom modifikatore' // *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova*. [Combined dispersed reinforcement of fine-grained concrete on technogenic raw materials and nanodispersed modifier / *Vestnik of BSTU named after V. G. Shukhov*]. № 3. Pp. 47-53.
4. Korotkikh, D. N. (2011). 'Dispersnoe armirovanie struktury betona pri mnogourovnevnom treshchinoobrazovanii' // *Stroitel'nye materialy*. [Dispersed reinforcement of concrete structure with multilevel crack formation / *Building materials*]. № 3. Pp. 96-99.
5. Saraikina, K. A., Golubev, V. A., Yakovlev, G. I., Sen'kov, S. A. and Politaeva, A. I. (2015) 'Nanostrukturirovanie tsementnogo kamnya pri dispersnom armirovanii bazal'tovym voloknom' / *Stroitel'nye materialy*. [Nanostructuring of cement stone with dispersed reinforcement with basalt fiber / *Building materials*]. № 2. Pp. 34-38.
6. Semenov, V. S., Rozovskaya, T. A., Gubskii, A. Yu. and Gareeva, R. R. (2016) 'Primenenie khrizotilovogo volokna dlya dispersnogo armirovaniya stroitel'nykh rastvorov' // *Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. [The use of chrysotile fiber for dispersed reinforcement of mortars / *Resource-energy-efficient technologies in the construction complex of the region*]. № 7. Pp. 93-97.
7. Urkhanova, L. A., Lkhasaranov, S. A., Rozina, V. E. and Buyantuev, S. L. (2015) 'Melkozernisty bazal'tofibrobeton s nanokremnezemom' // *Stroitel'nye materialy*. [Fine-grained basalt fiber concrete with nanosilica / *Building materials*]. № 6. Pp. 45-48.

8. Batayev, D. K.-S., Murtazaev, S.-A., Saidumov, M. S., Salamanova, M. Sh. and Aliev, S. A. (2016) Cement concrete composites on the basis of by-passed stone and stone milling wastes // *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*. Vol. 61 (4B). Pp. 327-336.
9. Evelson, L. and Lukutsova, N. (2015) Some practical aspects of fractal simulation of structure of nano-modified concrete // *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. 10 (19). Pp. 40454-40456.
10. Fediuk R., Pak A., Ginevskiy V., Stoyushko N. and Gladkova N. (2018) Environmental Hazard of Some Types of Expanded Polystyrene // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 115 (1). 012007.
11. Fediuk, R. S., Yevdokimova, Y. G., Smoliakov, A. K., Timokhin, R. A., Stoyushko, N. Y. and Batarshin, V. O. (2018) 'Nature raw materials of Russian PrimorskyKrai for concrete' / *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 87 (5). 052005.
12. Karpikov, E. G., Lukutsova, N. P., Bondarenko, E. A., Klyonov, V. V. and Zajcev, A. E. (2019) 'Effective Fine-Grained Concrete with High-Dispersed Additive Based on the Natural Mineral Wollastonite' // *Materials Science Forum*. Vol. 945. Pp. 85-90.
13. Lesovik, V. S., Urkhanova, L. A., Gridchin, A. M. and Lkhasaranov, S. A. (2014) 'Composite binders on the basis of pearlite raw material of Transbaikalia' // *Research Journal of Applied Sciences*. Vol. 9 (12). Pp. 1016-1020.
14. Lukutsova, N. P., Kulesh, I. A., Golovin, S. N. and Andrushin S.A. (2019). 'The Dependence of the Aggregate Stability to Concrete of Modifying Additives Based on Halloysite Nanotubes in Water Environment on the Character of the Stabilizer' // *Materials Science Forum*. Vol. 945. Pp. 287-292.
15. Lukutsova, N. and Ustinov, A. (2015). 'Concrete modified by additive based on biosilicated nanotubes' // *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. 10 (19). Pp. 40457-40460.
16. Pykin, A. A., Gornostaeva, E. Y., Lukutsova, N. P. and Pykina, J. S. (2019). 'Lightweight Concrete Based on Gypseous Binding Materials, Modified with Microcrystalline Cellulose, and Cavitationly Processed Sawdust' // *Materials Science Forum*. Vol. 945. Pp. 188-192.
17. Volodchenko, A. A., Lesovik, V. S., Zagorodnjuk, L.H. and Volodchenko, A. N. (2015). 'Influence of the inorganic modifier structure on structural composite properties' // *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. 10 (19). Pp. 40617-40622.
18. Volodchenko, A. N., Lukutsova, N. P., Prasolova, E. O., Lesovik, V. S. and Kuprina, A. A. (2014) Sand-clay raw materials for silicate materials production // *Advances in Environmental Biology*. Vol. 9 (12). Pp. 1087-1090.