

УДК 691.328.44

© И. У. Аубакирова, канд. техн. наук, доцент
© Ю. В. Пухаренко, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: centeririna@spbgasu.ru, tsik54@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-4-77-82

© I. U. Aubakirova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© Yu. V. Pukharensko, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: centeririna@spbgasu.ru, tsik54@yandex.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ФИБРОПЕНОБЕТОНА НА МАКРОУРОВНЕ*

FIBER FOAM CONCRETE STRUCTURE FORMATION AT THE MACROLEVEL

Приводится методика проектирования состава фибропенобетона с учетом определения оптимального содержания армирующих волокон для достижения требуемых свойств. Проведены экспериментальные исследования по формированию макроструктуры пенофибробетона с плотной упаковкой материала межпоровых перегородок с фибровой арматурой, обеспечивающей повышение прочности при заданной средней плотности.

Ключевые слова: макроструктура, дисперсное армирование, синтетические волокна, фибропенобетон.

The article presents a method for designing the composition of fiber foam concrete taking into account the determination of the optimal content of reinforcing fibers to achieve the required properties. There have been carried out experimental studies on the formation of the macrostructure of fiber foam concrete with dense packing of the material of inter-pore partitions with fiber reinforcement, which provides an increase in strength at a given average density.

Keywords: macrostructure, dispersed reinforcement, synthetic fibers, fiber foam concrete.

Введение

Макроструктура фибропенобетона, как и любого другого композиционного материала, представлена матрицей в виде сплошной дисперсионной среды и равномерно распределенными по ее объему армирующими волокнами (фиброй). Еще в 70-е годы прошлого столетия была установлена [1] и в дальнейшем подтверждена результатами многочисленных исследований [2–6] целесообразность улучшения свойств ячеистого бетона, в том числе пенобетона, путем армирования отрезками синтетических волокон (капроновых, лавсановых, полипропиленовых и т. п.).

* Работа выполнена при поддержке научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

В зависимости от средней плотности пенобетона, его состава, вида и характеристик сырьевых материалов, используемых при его получении, определены варианты армирования, размеры фибр и их концентрация в смеси, при которых обеспечиваются наилучшие показатели физико-механических характеристик композита. Вместе с тем, все эти результаты носят экспериментальный характер и зачастую не могут быть распространены на другие виды ячеистого бетона при изменении характеристик исходных компонентов или соотношения между ними в составе смеси. Для более полной реализации армирующих свойств синтетических волокон необходимо разработать теоретические основы создания плотной упаковки

материала межпоровых перегородок с фибровой арматурой, гарантирующей их надежное сцепление по поверхностям раздела, и дополнить этими положениями методику проектирования состава фибропенобетона, что и является целью данной работы.

Методика и материалы

Значительное количество работ в области создания и совершенствования способов определения состава бетонов определено широким многообразием их видов и модификаций с присущими только им особенностями и свойствами, позволяющими обеспечивать предъявляемые к ним требования.

Отличительной особенностью фибробетонов является наличие в их составе дисперсной арматуры, поэтому при назначении состава бетонной матрицы необходимо обращать внимание на изменения структуры и свойств материала, к которым приводит введение армирующих волокон. С учетом этого основополагающим принципом при формировании структуры фибропенобетона является представление о фибре как о части своеобразного заполнителя, который взаимодействует с цементным вяжущим и, благодаря высокой дисперсности, является подложкой для образования контактных зон повышенной плотности и прочности на границе раздела фаз. При достаточном насыщении волокнами это способствует переводу определенной части цементного теста в пленочное состояние, обеспечивает механическую устойчивость и ускоренный набор прочности фибробетонной смеси [7–10].

Таким образом, задача проектирования состава фибропенобетона сводится к рациональному выбору исходных компонентов (вяжущего, заполнителей и наполнителей, армирующих волокон и добавок), а также к определению соотношения между ними, обеспечивающего получение оптимальной структуры и заданных свойств композита. Для выполнения данного условия предлагается методика, предусматривающая опреде-

ление состава минеральной части композита (исходного бетона) одним из существующих для этого способов с последующей корректировкой с учетом количества и характеристик вводимых волокон.

Определение состава исходной пенобетонной смеси может осуществляться по методике, изложенной в Инструкции¹.

Расчетное количество армирующих волокон может быть получено из соотношения (1) между их объемом V_Φ и объемом контактных зон $V_{\text{цк}}^\Phi$, учитывая, что оно такое же, как и соотношение площадей их поперечных сечений, а толщина контактной зоны цементного камня δ_Φ , связанная с фиброй, согласно [11], составляет $1,12r_\Phi$:

$$\frac{V_\Phi}{V_{\text{цк}}^\Phi} = \frac{F_\Phi}{F_{\text{цк}}^\Phi} = \frac{\pi r_\Phi^2}{\pi (r_\Phi + \delta_\Phi)^2 - \pi r_\Phi^2} = \frac{r_\Phi^2}{(r_\Phi + 1,12r_\Phi)^2 - r_\Phi^2} = \frac{1}{3,49}, \quad (1)$$

где F_Φ и $F_{\text{цк}}^\Phi$ — площади поперечных сечений фибры и контактной зоны; r_Φ — радиус фибры.

Отсюда

$$V_\Phi = \frac{V_{\text{цк}}^\Phi}{3,49}. \quad (2)$$

Объем цементного камня, который необходимо затратить на создание контактных зон вокруг синтетических фибр, составляет:

$$V_{\text{цк}}^\Phi = V_{\text{цк}} - V_{\text{цк}}^{\text{пор}} - V_{\text{цк}}^3, \quad (3)$$

где $V_{\text{цк}}$ — абсолютный объем цементного камня в составе пенобетона после гидратации; $V_{\text{цк}}^{\text{пор}}$ — объем цементного камня, затраченный на образование контактных зон вокруг ячейковых пор; $V_{\text{цк}}^3$ — объем цементного камня, затраченный на образование контактных зон вокруг зерен заполнителя;

$$V_{\text{цк}} = \frac{m_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{0,15m_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}}, \quad (4)$$

здесь $m_{\text{ц}}$ и $m_{\text{в}}$ — масса цемента и воды в составе пенобетонной смеси; $\rho_{\text{ц}}$ и $\rho_{\text{в}}$ — истинная плотность цемента и воды;

¹ СН 277–80. Строительные нормы. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона.

$$V_{\text{п.пор}}^{\text{пор}} = \sum n_i \left(\frac{\pi (d_i + 2\delta)^3}{6} - \frac{\pi d_i^3}{6} \right) = \frac{\pi}{6} \sum n_i [(d_i + 2\delta)^3 - d_i^3], \quad (5)$$

здесь $\delta = 13 \times 10^{-6}$ м — толщина контактной зоны вокруг ячейковых пор и зерен заполнителя; n_i — число пор i -го диаметра d_i ;

$$V_{\text{п.з}}^3 = \delta S_{\text{уд}} m_3, \quad (6)$$

здесь $S_{\text{уд}}$ — удельная поверхность зерен заполнителя; m_3 — масса заполнителя в смеси.

Расчетное количество армирующих волокон получим после проведения соответствующих вычислений и испытаний. Завершающим этапом процедуры проектирования состава фибропенобетона является корректировка исходного соотношения между заполнителем и вяжущим веществом C , так как оно утрачивает оптимальность при добавлении в смесь расчетного количества армирующих волокон, которое, как было указано выше, равносильно введению дополнительного заполнителя. Для сохранения оптимальности долю минерального заполнителя следует уменьшить на некоторую величину, эквивалентную объему вводимых волокон:

$$C^* = (m_3 - \Delta m_3) : m_{\text{ц}}, \quad (7)$$

где C^* — соотношение между заполнителем и цементом в фибропенобетоне; m_3 — масса заполнителя в исходном пенобетоне; Δm_3 — масса заполнителя, эквивалентная объему вводимых волокон; $m_{\text{ц}}$ — масса цемента.

Для определения Δm_3 зерна заполнителя целесообразно представить в виде шаров, суммарный объем которых с учетом межзерновой пустотности соизмерим с объемом всех цилиндрических фибр, добавляемых в смесь. Выражение для нахождения Δm_3 имеет вид:

$$\Delta m_3 = \rho_{\text{з.ср}} V_3, \quad (8)$$

где $\rho_{\text{з.ср}}$ — плотность зерен заполнителя; V_3 — суммарный объем зерен заполнителя, составляющих массу Δm_3 , и эквивалентный объему вводимых фибр $V_{\text{ф}}$,

$$V_3 = V_{\text{ф}} (1 - \Pi),$$

здесь Π — пустотность заполнителя.

Заменяя в предыдущем выражении Π известной формулой пустотности, получаем:

$$V_3 = \frac{\rho_{\text{з.нас}}}{\rho_{\text{з.ср}}} V_{\text{ф}},$$

где $\rho_{\text{з.нас}}$ — насыпная плотность заполнителя.

С учетом найденного значения

$$\Delta m_3 = \frac{\rho_{\text{з.нас}}}{\rho_{\text{ф.ист}}} m_{\text{ф}}, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{ф.ист}}$ — истинная плотность армирующих волокон; $m_{\text{ф}}$ — масса вводимых в смесь волокон.

Выражая количество волокон в формуле (9) через процент армирования μ , получаем

$$\Delta m_3 = \frac{\rho_{\text{з.нас}}}{\rho_{\text{ф.ист}}} \mu (m_{\text{ц}} + m_3). \quad (10)$$

После преобразований выражения (7) с учетом найденного значения Δm_3 получим формулу для определения оптимального соотношения между минеральным заполнителем и цементом в фибропенобетоне:

$$C^* = m_3^* : m_{\text{ц}} = C - \frac{\rho_{\text{з.нас}}}{\rho_{\text{ф.ист}}} \mu (1 + C), \quad (11)$$

где m_3^* — масса заполнителя в составе фибропенобетона.

Оценка эффективности предлагаемых решений производилась по результатам испытания лабораторных образцов, изготовленных с применением следующих исходных материалов: портландцемент класса ЦЕМ I 42,5 Н производства Сланцевского цементного завода «Цесла»; гранулированный доменный шлак с наибольшим диаметром зерен 1,25 мм, насыпной плотностью 1250 кг/м³ и плотностью зерен 2100 кг/м³; синтетическая микрофибра «Fibrin ХТ»; синтетический пенообразователь «ПБ-Формула 2012» производства ЗАО «ЭГИДА ПТВ» по ТУ 2481-008-80824910-2012. Заданная средняя плотность фибропенобетона составляла 500 кг/м³.

Результаты

В соответствии с предлагаемой методикой на первом этапе проведения исследований

Таблица 1

Состав и свойства пенобетона

Наименование показателя	Значение показателя	
Расход компонентов на 1 м ³ пенобетонной смеси, кг	цемент	227
	граншлак	227
	вода	195
	пенообразователь	1,25
Средняя плотность пенобетона, кг/м ³	503	
Прочность пенобетона через 28 сут твердения в нормальных условиях, МПа	на сжатие	1,16
	на изгиб	0,2

Таблица 2

Характеристика пористости пенобетона

Наименование показателя	Значение показателя											
Диаметр пор, d, мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Удельное количество, V, %	27,72	20,98	12,13	7,03	6,83	5,20	4,72	4,23	3,18	2,21	1,54	1,15
Диаметр пор, d, мм	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,5	
Удельное количество, V, %	0,67	0,48	0,38	0,29	0,29	0,19	0,19	0,19	0,10	0,10	0,10	

разработан состав исходного пенобетона и определены его характеристики (табл. 1).

Количество армирующих волокон в составе фибропенобетона рассчитывалось по формулам (2)–(6). Для этого методом микроскопического анализа шлифов пенобетона определялись параметры порового пространства. Распределение пор по диаметрам представлено в табл. 2.

Кроме этого, для определения объема цементного камня в контактных зонах на поверхности зерен граншлака вычислена его удельная поверхность по формуле Ладинского [12, формула (2.7)], которая составила $S_{уд} = 13,64 \text{ м}^2/\text{кг}$.

С учетом полученных дополнительных данных объем цементного камня, который образует контактные зоны вокруг синтетических фибр,

$$V_{цк}^{\Phi} = V_{цк} - V_{цк}^{\text{пор}} - V_{цк}^3 = \\ = 107,28 - 53,82 - 40,26 = 13,20 \text{ л.}$$

В соответствии с этим объем армирующих волокон

$$V_{\Phi} = \frac{V_{цк}^{\Phi}}{3,49} = \frac{13,20}{3,49} = 3,78 \text{ л.}$$

Из табл. 1 следует, что соотношение между граншлаком и цементом в исходном пенобетоне $C = 1$. Согласно предлагаемой методике, его следует откорректировать с учетом вводимых в сырьевую смесь армирующих волокон:

$$C^* = C - \frac{P_{з.нас}}{P_{ф.ист}} \mu (1 + C) = 1 - \frac{1250}{900} 0,007 (1 + 1) = 0,98.$$

Состав фибропенобетона с учетом соотношения C^* , а также его физико-механические характеристики, полученные в результате испытаний образцов, приведены в табл. 3.

Выводы

В результате проведенных исследований развиты научные основы формирования структуры фибропенобетона на макроуровне, предусматривающие более полную реализацию армирующих свойств синтетических волокон путем создания плотной упаковки материала межпоровых перегородок с фибровой арматурой, обеспечивающей их надежное взаимное сцепление по поверхностям раздела и повышение прочности при заданной средней плотности. В связи с этим разработаны теоретические положения, основанные на представлении о фибре как части своеоб-

Таблица 3

Состав и свойства фибропенобетона

Наименование показателя		Значение показателя	
		при соотношении С	при соотношении С*
Расход компонентов на 1 м ³ фибропенобетонной смеси, кг	цемент	227	229
	граншлак	227	225
	вода	195	195
	пенообразователь	1,25	1,25
	фибра	3,4	3,4
Средняя плотность фибропенобетона, кг/м ³		498	495
Прочность фибропенобетона через 28 сут твердения в нормальных условиях, МПа	на сжатие	1,6	1,8
	на изгиб	0,5	0,8

разного заполнителя, и формулы, которыми предлагается дополнить методику проектирования состава фибропенобетона.

Библиографический список

1. Пухаренко Ю. В. Газобетон, дисперсно-армированный неметаллическими волокнами // Технология строительных изделий и конструкций: Межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ. 1979. С. 55–58.
2. Жуков А. Д., Рудницкая В. А. Пенобетон, армированный базальтовой фиброй // Вестник МГСУ. 2012. № 6. С. 83–87.
3. Перфилов В. А., Канавец У. В., Котляревская А. В., Храпов И. О. Влияние вида пенообразователя и модифицирующих добавок на прочность и плотность пенофибробетонов // Известия ВолгГТУ. 2016. № 15. С. 39–43.
4. Кодзоев М.-Б. Х. Ячеистый бетон, армированный минеральными волокнами // Бюллетень науки и практики. 2017. № 10. С. 134–137.
5. Голова Т. А., Магеррамова И. А., Андреева Н. В. Технология производства неавтоклавных пенобетонов, дисперсно-армированных модифицированными волокнами // Вестник ВолгГАСУ. 2020. № 1. С. 126–135.
6. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У. Полидисперсное армирование фибробетонов // Технологии бетонов. 2011. № 1–2 (54–55). С. 28–29.
7. Лобанов И. А., Пухаренко Ю. В., Моргун Л. В. Безавтоклавные ячеистые бетоны, армированные синтетическими волокнами // Бетон и железобетон. 1983. № 8. С. 28–30.
8. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У., Старовров В. Д. Влияние армирующих волокон на формирование структуры ячеистых бетонов в раннем возрасте // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3 (44). С. 154–158.
9. Кудяков А. И., Стещенко А. Б. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения // Вестник ТГАСУ. 2014. № 2. С. 127–133.
10. Pukcharenko Yu., Morozov V. Structural Model and Strength Predicting of Fiber-Reinforced Concrete // World Applied Sciences Journal, 23 (Problems of Architecture and Construction). 2013. Pp. 111–116.
11. Пухаренко Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / Пухаренко Юрий Владимирович ; С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. СПб., 2005. 41 с.
12. Боженков Ю. М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2007. 528 с.

References

1. Pukharenko Yu. V. *Gazobeton, dispersno-armirovanniy nemetallichesкими voloknami* [Aerated concrete dispersed reinforced with non-metallic fibers]. *Trudy mezhvuz. temat. konf. «Tekhnologiya stroitel'nykh izdeliy i konstruktсий»* [Proceedings of the inter-university thematic conference "Technology of Building Products and Structures"]. Leningrad, LISI Publ., 1979, pp. 55–58.
2. Zhukov A. D., Rudnitskaya V. A. *Penobeton, armirovanniy bazal'tovoy fibroy* [Fiber foam concrete reinforced with basalt fiber]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2012, no. 6, pp. 83–87.
3. Perfilov V. A., Kanavets U. V., Kotlyarevskaya A. V., Khrapov I. O. *Vliyanie vida penoobrazovatelya i modifitsiruyushchikh dobavok na prochnost' i plotnost' penofibrobetonov* [Influence of the foaming agent and modifying additives type on the strength and density of fiber foam concrete]. *Izvestiya VolgGTU – Bulletin of VolgaGTU*, 2016, no. 15, pp. 39–43.
4. Kodzoev M.-B. Kh. *Yacheistiy beton, armirovanniy mineral'nymi voloknami* [Cellular concrete reinforced

with mineral fibers]. *Byulleten' nauki i praktiki – Bulletin of Science and Practice*, 2017, no. 10, pp. 134–137.

5. Golova T. A., Magerramova I. A., Andreeva N. V. *Tekhnologiya proizvodstva neavtoklavnykh penobetonov, dispersno-armirovannykh modifitsirovannymi voloknami* [Technology for the production of non-autoclave foam concrete dispersed reinforced with modified fibers]. *Vestnik VolgGASU – Bulletin of VolgaGASU*, 2020, no. 1, pp. 126–135.

6. Pukharensko Yu. V., Aubakirova I. U. *Polidispersnoe armirovanie fibrobetonov* [Poly-disperse reinforcement of fiber concrete]. *Tekhnologii betonov – Concrete Technologies*, 2011, no. 1–2 (54–55), pp. 28–29.

7. Lobanov I. A., Pukharensko Yu. V., Morgun L. V. *Bezavtoklavnye yacheistye betony, armirovannye sinteticheskimi voloknami* [Non-autoclave cellular concrete reinforced with synthetic fibers]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and Reinforced Concrete*, 1983, no. 8, pp. 28–30.

8. Pukharensko Yu. V., Aubakirova I. U., Staroverov V. D. *Vliyaniye armiruyushchikh volokon na formirovaniye struktury yacheistyykh betonov v rannem vozraste* [The

influence of reinforcing fibers on the formation of the structure of cellular concrete at an early age]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2014, no. 3 (44), pp. 154–158.

9. Kudyakov A. I., Steshenko A. B. *Penobeton dispersno-armirovanniy teploizolyatsionniy estestvennogo tverdeniya* [Fiber foam concrete dispersed-reinforced with thermal insulation of natural hardening]. *Vestnik TGASU – Bulletin of TGASU*, 2014, no. 2, pp. 127–133.

10. Pukharensko Yu., Morozov V. Structural Model and Strength Predicting of Fiber-Reinforced Concrete. *World Applied Sciences Journal (Problems of Architecture and Construction)*, 2013, no. 23, pp. 111–116.

11. Pukharensko Yu. V. *Nauchnye i prakticheskie osnovy formirovaniya struktury i svoystv fibrobetonov. Avtoreferat diss. dokt. tekhn. nauk* [Scientific and practical foundations for the formation of the structure and properties of fiber concrete. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, GASU Publ., 2005, 41 p.

12. Bozhenov Yu. M. *Tekhnologiya betona* [Concrete technology]. Moscow, ASV Publ., 2007, 528 p.