УДК 693.554-486; 691.328

© Ю. В. Пухаренко, д-р техн. наук, профессор
© В. В. Инчик, д-р техн. наук, профессор
© Д. А. Пантелеев, канд. техн. наук, ст. преподаватель
© М. И. Жаворонков, ассистент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: tsik@spbgasu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-118-122

© Yu. V. Pukharens, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. V. Inchik, Dr. Sci. Tech., Professor
© D. A. Panteleev, PhD in Sci. Tech., senior lecturer
© M. I. Zhavoronkov, assistant lecturer
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: tsik@spbgasu.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ПОЛИАРМИРОВАННЫХ ФИБРОБЕТОНОВ*

DESIGNING OF POLY-FIBER-REINFORCED CONCRETE COMPOSITIONS

Рассматриваются вопросы, посвященные проектированию составов дисперсно армированных бетонов. Разработана методика проектирования составов полиармированных фибробетонов с заданной прочностью на растяжение при изгибе и вязкостью разрушения. С помощью предложенной методики проведен расчет состава фибробетона с использованием аморфнометаллической и стальной фибры для наземных резервуаров автозаправочных комплексов.

Ключевые слова: фибробетон, полиармирование, вязкость разрушения, прочность на растяжение при изгибе.

The paper discusses issues related to the design of fiber reinforced concrete compositions. There has been developed a technique of designing fiber reinforced concrete compositions with any desired degree of tensile strength in bending and fracture toughness. Using the proposed technique, there has been carried out calculation of fiber reinforced concrete composition using amorphous metal and steel fiber for land storage tanks of gas stations.

Keywords: fiber reinforced concrete, poly-fiber reinforcement, fracture toughness, bending tensile strength.

В разное время вопросами проектирования составов дисперсно армированных бетонов занимались Ю. М. Баженов, Л. Г. Курбатов, И. А. Лобанов, Ф. Н. Рабинович и многие другие ученые [1–3]. Тем не менее нельзя считать данную задачу полностью решенной, так как постоянно возникают все новые виды бетонов, фибры разного типа и размера, а также требования, предъявляемые к композитам и конструкциям на их основе.

На сегодняшний день существует ограниченное количество нормативно-технических документов, посвященных дисперсному армированию, в которых содержится лишь поверхностная информация о составах фибробетонов и методиках, основанных исключительно на эмпирическом подходе, ограничивающем промышленное производство и применение дисперсного

армирования. Главный недостаток упомянутых методик заключается в некорректности постановки задания на проектирование составов фибробетонных смесей: не предъявляется никаких требований по трещиностойкости, вязкости разрушения и даже по прочности на растяжение и изгиб, то есть не указывается ничего того, ради чего и осуществляется дисперсное армирование. Следовательно, без предъявления особых требований к фибробетону уже с самого начала утрачивается целенаправленность процедуры проектирования его состава.

В СПбГАСУ сформулирован общий подход к проектированию составов фибробетонов, а также разработаны частные методики подбора составов разного вида фибробетонов: легкого, ячеистого, тяжелого крупно- и мелкозернистого фибробетона [4]. Фундаментальным принципом данного подхода является представление о дисперсной арматуре как о части своеобразного заполнителя, который обладает развитой боковой

* Выполнено в соответствии с планом фундаментальных научных исследований Министра России и РААСН на 2018 г. при поддержке правительства Санкт-Петербурга (конкурс грантов Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук 2017 г.).

поверхностью и оказывает серьезное влияние на реологические и технологические характеристики фибробетонной смеси. В ходе предварительных экспериментальных исследований [5, 6] были получены следующие данные о структурообразующей роли армирующих волокон в композите:

- армирующие волокна взаимодействуют с цементной матрицей композита и тем самым образуют некую подложку для формирования контактных зон на границе раздела фаз;
- армирующие волокна при определенном содержании образуют так называемый пространственный каркас, формируя минимальную пустотность и сокращая расход портландцемента;
- высокая степень дисперсности и непрерывный пространственный каркас создают препятствие для возникновения и распространения трещин, повышая вязкость разрушения и трещиностойкость композита;
- тесное взаимодействие армирующих волокон с матрицей композита на границе раздела фаз приводит к повышению сцепления между компонентами.

Обобщая проделанный литературный обзор, можно сделать вывод о том, что главной задачей при проектировании составов фибробетонов является рациональный выбор армирующих волокон, которые соответствовали бы условиям их работы, а значит, в момент постановки задания необходимо задаваться размером, видом и назначением изделия; пределом прочности на растяжение при изгибе, пределом прочности при сжатии и вязкостью разрушения; удобоукладываемостью смеси; в определенных случаях — морозостойкостью, водонепроницаемостью, истираемостью, ударостойкостью и другими характеристиками.

Следует отметить, что разработанные ранее методики по проектированию составов фибробетонов были посвящены только варианту моноармирования. С учетом изложенного и в продолжение проведенных экспериментальных исследований разработана методика проектирования составов фибробетонов для полиармирования, в соответствии с которой:

1) по стандартной методике определяется состав матрицы композита — неармированного бетона;

2) по результатам предварительных экспериментов или из имеющихся статистических данных выбирается эффективное соотношение между применяемыми волокнами;

3) рассчитывается общее объемное содержание волокон, необходимое для обеспечения заданной прочности полиармированного фибробетона:

$$\mu = \frac{R_{\text{фб}} - R_6}{\left[R_{\text{в1}} n + 2\tau_{\text{в2}} \frac{l_{\text{в2}}}{d_{\text{в2}}} (1-n) \right] + 3,5R_{\text{к.з}} - 4,5R_6}, \quad (1)$$

где $R_{\text{фб}}$ — прочность полиармированного фибробетона; R_6 — прочность бетона; $R_{\text{в1}}$ — прочность волокна, разрывающегося во время испытания (прочная связь волокна с бетонной матрицей) [7]; n — доля одного вида волокна в общем объеме армирования; $l_{\text{в2}}$ — длина волокна, вытягивающегося из бетонной матрицы во время испытания; $d_{\text{в2}}$ — диаметр волокна, вытягивающегося из бетонной матрицы во время испытания; $R_{\text{к.з}}$ — прочность контактной зоны на границе раздела матрицы и волокна ($R_{\text{к.з}} = 1,4R_6$); $\tau_{\text{в2}}$ — прочность сцепления волокна (отсутствие прочной связи волокна с бетонной матрицей) на границе раздела фаз, которая рассчитывается по формуле (2):

$$\tau_{\text{в2}} = \frac{R_{\text{фц}} - 3,5R_{\text{к.з}}\mu_{\text{min}} - (1 - 4,5\mu_{\text{min}})R_{\text{ц.к}}}{2 \frac{l_{\text{в2}}}{d_{\text{в2}}} \mu_{\text{min}}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{фц}}$ — прочность фиброцемента; μ_{min} — минимальное объемное содержание волокон; $R_{\text{ц.к}}$ — прочность цементного камня, изготовленного из теста нормальной густоты;

4) рассчитывается общее объемное содержание волокон, обеспечивающее получение полиармированного фибробетона заданной вязкости разрушения [8]:

$$\mu = \frac{6W_{\text{фб}}}{\left(\frac{l_{\text{в1кр}}^2 \sigma_{\text{в1}}^{\text{max}} n}{2l_{\text{в1}}} + \frac{\tau_{\text{в2}} l_{\text{в2}}^2 (1-n)}{d_{\text{в2}}} \right)}, \quad (3)$$

где $W_{\text{фб}}$ — энергия разрушения полиармированного фибробетона; $l_{\text{в1кр}}$ — критическая длина, при которой происходит разрыв волокна из бетонной матрицы во время испытания; $\sigma_{\text{в1}}^{\text{max}}$ — максимальное нормальное напряжение волокна, вытягивающегося из матрицы во время испы-

тания; $l_{в1}$ — длина волокна, вытягивающегося из матрицы во время испытания (прочная связь волокна с бетонной матрицей);

5) из двух полученных значений μ используется наибольшее;

6) согласно заданию на проектирование состава фибробетонной смеси путем изготовления и испытания образцов определяются требуемые характеристики фибробетона;

7) производится корректировка состава фибробетонной смеси стандартными методами.

С помощью предложенной методики запроектирован состав фибробетонной смеси для наземных резервуаров автозаправочных комплексов с применением аморфнометаллической фибры, обладающей прочной связью с бетонной матрицей, и стальной, прочная связь которой с бетонной матрицей отсутствует. Резервуар предназначен для хранения нефтепродуктов, сжиженного и сжатого природного газа и представляет собой многослойную конструкцию с пятью степенями защиты. В целом конструкцией резервуара является монолитное изделие, изготовленное из 80-миллиметрового слоя фиброжелезобетона.

Класс бетона по прочности при сжатии В40, прочность при изгибе не менее $R_{изг} = 20$ МПа, вязкость разрушения $W_{фб} = 700$ Дж, подвижность бетонной смеси — ОК = 15 см.

В ходе исследований применялись следующие материалы:

- портландцемент бездобавочный марки ПЦ500Д0 производства ОАО «Осколцемент»;

- кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 2,34$; истинной плотностью $\rho_i = 2650$ кг/м³; насыпной плотностью $\rho_n = 1650$ кг/м³; насыпной плотностью в уплотненном состоянии $\rho_{упл} = 2000$ кг/м³;

- фибра стальная, волнового профиля из проволочки длиной $l = 22$ мм, диаметром $d = 0,3$ мм, длиной волны 5,5 мм, с боковой поверхностью 0,94 мм²;

- фибра аморфная металлическая длиной $l = 30$ мм, эквивалентным диаметром $d_{экв} = 0,3$ мм, с боковой поверхностью 6,06 мм².

Для обеспечения высокой степени дисперсности армирования стальной и аморфнометаллической фиброй в качестве матрицы композита применялся мелкозернистый бетон.

Для определения удельной поверхности кварцевого песка использовалась формула А. С. Ладинского:

$$S_{уд} = \frac{16,5K_{\phi}}{1000} \times$$

$$\times (a + 2b + 4c + 8d + 16e + 32f) = 1910 \text{ см}^2/\text{г}, \quad (4)$$

где K_{ϕ} — коэффициент, учитывающий форму зерен мелкого заполнителя (1,3 — для речных и морских песков, сильно окатанных; 1,7 — для речных и морских песков; 2,1 — для горных песков); a, b, c, d, e, f — частные остатки на ситах с диаметром отверстий, мм: 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 и количество заполнителя, прошедшего через сито 0,14 мм.

Для нахождения оптимального соотношения между компонентами бетонной смеси был определен модуль эффективности по формуле

$$M_{эф} = \frac{\alpha}{\rho_{упл}} + \delta S_{уд} = \frac{0,25}{2,0} + 0,00013 \cdot 1910 = 0,37 \text{ л/кг}, \quad (5)$$

где α — пустотность мелкого заполнителя после уплотнения на виброударной установке; $\rho_{упл}$ — насыпная плотность мелкого заполнителя в уплотненном состоянии; δ — толщина пленки цементного теста на поверхности зерен, равная 13 мкм; $S_{уд}$ — удельная поверхность мелкого заполнителя.

Определяем отношение воды к цементу, которое необходимо для получения заданных характеристик:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{AR_{ц}}{R_6 + 0,8AR_{ц}} = \frac{0,75 \cdot 500 \cdot 0,1}{50 + 0,75 \cdot 500 \cdot 0,8 \cdot 0,1} = 0,47. \quad (6)$$

С учетом полученного значения $M_{эф}$ при помощи уравнения (7) определено соотношение между цементом и песком:

$$Ц:П = 1 : \frac{1 + B/Ц}{M_{эф}\rho_{ц,т}} = 1 : \frac{1 + 0,47}{0,37 \cdot 1,8} = 1 : 2,2, \quad (7)$$

где $\rho_{ц,т}$ — плотность цементного теста.

Расход материалов (песка, цемента, воды) на 1 м³ бетона:

$$П = \frac{1000\rho_i}{1 + M_{эф}\rho_i} = \frac{1000 \cdot 2,65}{1 + 0,37 \cdot 2,65} = 1338 \text{ кг}; \quad (8)$$

$$Ц = \frac{П}{n} = \frac{1338}{2,2} = 608 \text{ кг}; \quad (9)$$

$$В = Ц \cdot B/Ц = 608 \cdot 0,47 = 285 \text{ л}. \quad (10)$$

В ходе испытаний образцов неармированного бетона были определены прочностные характеристики: $R_{сж} = 48,7$ МПа, $R_{изг} = 8,1$ МПа.

По формуле (1) рассчитываем общее объемное содержание волокон, которое необходимо для того, чтобы обеспечить полиармированному фибробетону его заданную прочность при изгибе:

$$\mu = \frac{R_{фб} - R_б}{\left[R_{ам.ф} \cdot n + 2\tau_{ст.ф} \frac{l_{ст.ф}}{d_{ст.ф}} (1-n) \right] + 3,5R_{к.з} - 4,5R_б};$$

$$\mu = \frac{20 - 8,1}{\left[996 \cdot 0,6 + 2 \cdot 3,08 \frac{22}{0,3} (1 - 0,6) \right] + 3,5 \cdot 11,34 - 4,5 \cdot 8,1} = 1,52 \text{ \%}.$$

По формуле (3) рассчитываем общее объемное содержание волокон, которое обеспечит получение полиармированного фибробетона заданной вязкости разрушения:

$$\mu = \frac{6W_{фб}}{\left(\frac{l_{ам.ф.кр}^2 \sigma_{ам.ф}^{max}}{2l_{ам.ф}} + \frac{\tau_{ст.ф} l_{ст.ф}^2 (1-n)}{d_{ст.ф}} \right)};$$

$$\mu = \frac{6 \cdot 700}{\frac{7,6^2 \cdot 870 \cdot 0,6}{2 \cdot 30} + \frac{3,08 \cdot 22^2 (1 - 0,6)}{0,3}} = 1,69 \text{ \%}.$$

«Для обеспечения заданных характеристик полиармированного фибробетона общее количество применяемых волокон в бетоне должно составлять 1,69 %. Экспериментальные данные, полученные в ходе предыдущих исследований [9, 10], показали, что наибольшей эффективности можно добиться при использовании комбинирования аморфной металлической фибры со стальной в соотношении 0,6 к 0,4, следовательно, объемная доля аморфнометаллических волокон составит 1,01 %, стальных — 0,68 %» [11].

При помощи проведенных пробных замесов было установлено, что для обеспечения заданной подвижности необходимо уменьшить расход воды и ввести добавку-суперпластификатор *Schomburg Remicrete SP-10 (FM)* в количестве 0,7 % от массы цемента.

Следовательно, состав полиармированной фибробетонной смеси на 1 м³:

- портландцемент — 608 кг;
- кварцевый песок — 1338 кг;

- фибра аморфная металлическая — 79,3 кг;
- фибра стальная, волнового профиля — 53,4 кг;
- суперпластификатор — 4,55 кг.

По результатам испытаний фибробетонных образцов установлено, что прочность при сжатии составляет $R_{сж} = 55,1$ МПа; прочность при изгибе — $R_{изг} = 20,2$ МПа; вязкость разрушения, которая определяется экспериментальным методом и выражается при помощи критерия хрупкости, $X_F^c = 86$ м. По ранее полученным данным [8] известно, что, определив значение критерия хрупкости X_F^c , можно рассчитать энергию, затрачиваемую на разрушение композита, которая равняется $W_{фб} = 10X_F^c \approx 860$ Дж.

В заключение можно сделать вывод о том, что предложенная методика проектирования составов полиармированных фибробетонных смесей позволяет разрабатывать фибробетонные смеси с требуемой прочностью и вязкостью разрушения композита.

Библиографический список

1. Пухаренко Ю. В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонных // Вестник гражданских инженеров. 2004. № 1 (1). С. 98–103.
2. Талантова К. В. Оптимизация расхода стальной фибры при проектировании конструкций на основе сталефибробетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 8 (668). С. 99–106.
3. Ключев А. В., Митрохин А. А., Черкашин Ю. Н., Лесовик Г. А. Расчет фибробетонных композитов // сб. науч. тр. SWorld. 2014. Т. 18, № 3. С. 61–65.
4. Пухаренко Ю. В., Ковалева А. Ю. Вопросы и решения в проектировании состава фибробетона // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2009. № 1. С. 50–55.
5. Магдеев У. Х., Пухаренко Ю. В., Морозов В. И., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 31 (50). С. 132–135.
6. Пантелеев Д. А. Оценка эффективности полиармирования фибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 6 (41). С. 102–108.
7. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 172–176.

8. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Морозов В. И., Магдеев У. Х. Прочность и деформативность полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 1. С. 107–111.

9. Фибробетонная смесь: пат. 2575658 Российская Федерация / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков, С. В. Карамышев; СПбГАСУ; заявл. 17.12.2014; опубл. 20.02.2016.

10. Пантелеев Д. А. Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона // Известия КГАСУ. 2015. № 3 (33). С. 133–139.

11. Пантелеев Д. А. Полиармированный фибробетон с использованием аморфнометаллической фибры: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 155 с.

References

1. Pukharensko Yu. V. *Printsipy formirovaniya struktury i prognozirovaniye prochnosti fibrobetonov* [Principles of formation of structure and forecasting of durability of fiber reinforced concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2004, no. 1, pp. 98–103.

2. Talantova K. V. *Optimizatsiya raskhoda stal'noy fibry pri proektirovani konstruktur na osnove stalefibrobetona* [Optimization of steel fiber consumption at design of structures based of steel fiber concrete]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – News of higher educational institutions. Construction*, 2014, no. 8 (668), pp. 99–106.

3. Klyuev A. V., Mitrokhin A. A., Cherkashin Yu. N., Lesovik G. A. *Raschet fibrobetonnykh kompozitov* [Calculation of fiber reinforced concrete composites]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld* [Coll. of scientific works of SWorld]. 2014, vol. 18, no. 3, pp. 61–65.

4. Pukharensko Yu. V. *Voprosy i resheniya v proektirovani sostava fibrobetona* [Problems and solutions in the design of fiber reinforced concrete structures]. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie smesi – ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes*, 2009, no. 1, pp. 50–55.

5. Magdeev U. Kh., et al. *Issledovanie svoystv stalefibrobetona na osnove amorfnoy metallicheskoj fibry* [Study of properties of a steel fiber reinforced concrete on the basis of an amorphous metal fiber]. *Vestnik VolgGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura Bulletin of VOLGGASU. Construction and architecture*, 2013, no. 31 (50), pp. 132–135.

6. Panteleev D. A. *Otsenka ehffektivnosti poliarmirovaniya fibrobetona* [Assessment of efficiency of fiber concrete poly-reinforcement]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 6 (41), pp. 102–108.

7. Pukharensko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. *Opreделение vkladа fibry v formirovaniye prochnosti stalefibrobetona* [Determination of fiber contribution to formation of steel fiber reinforced concrete durability]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 1 (60), pp. 172–176.

8. Pukharensko Yu. V., Panteleev D. A., Morozov V. I., Magdeev U. Kh. *Prochnost' i deformativnost' poliarmirovannogo fibrobetona s primeneniye amorfnoy metallicheskoj fibry* [Durability and deformability of the polyreinforced fiber concrete with application of amorphous metal fiber]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo – Academia. Architecture and construction*, 2016, no. 1, pp. 107–111.

9. Pukharensko Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I., Karamyshev S. V. *Fibrobetonnaya smes'* [Fiber concrete mixture]. Patent RF no. 2575658, 2016.

10. Panteleev D. A. *Deformativnye i prochnostnye kharakteristiki poliarmirovannogo fibrobetona* [Deformability and strength characteristics of poly-reinforced fiber concrete]. *Izvestiya KGASU – Bulletin of KGASU*, 2015, no. 3 (33), pp. 133–139.

11. Panteleev D. A. *Poliarmirovannyy fibrobeton s ispol'zovaniye amorfno-metallicheskoj fibry*. Diss. kand. tekhn. nauk [Poly-reinforced fiber concrete with use of amorphous metal fiber. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2016, 155 p.