УДК 691.328.44

© М. П. Кострикин, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: kostrikm@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-128-133

© М. P. Kostrikin, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: kostrikm@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИСПЕРСНОГО ПОЛИАРМИРОВАНИЯ БЕТОНА НИЗКОМОДУЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ

EFFICIENCY OF DISPERSED CONCRETE HYBRID FIBER REINFORCEMENT WITH LOW-MODULUS FIBERS

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния низкомодульных синтетических микро- и макроволокон в отдельности и их комбинаций на характеристики прочности и долговечности фибробетона. На основании полученных данных испытаний фибробетонных образцов на растяжение при изгибе построены диаграммы их деформирования, по которым установлено влияние отдельных видов волокон и их комбинаций при полиармировании на характер разрушения композитов, рассчитаны величины их силовых и энергетических характеристик. Определены эффективные соотношения между волокнами при полиармировании, позволяющие получить фибробетон с высокими показателями прочности и долговечности.

Ключевые слова: фибробетон, низкомодульное волокно, синтетическая фибра, полиармирование, прочность, долговечность.

The article describes the results of experimental studies of the effect of low-modulus synthetic micro- and macro-fibers, taken separately and in combinations, on strength and durability of fiber-reinforced concrete. On the basis of the obtained data in fiber-reinforced concrete specimens testing for tension in bending, there were constructed diagrams of the deformation, according to which the influence of individual types of fibers and their combinations during hybrid reinforcement on the type of the destruction of composites was determined, the values of their power and energy characteristics were calculated. The effective ratios between the fibers during hybrid fiber-reinforcement have been determined, which makes it possible to obtain fiber-reinforced concrete with high strength and durability indicators.

Keywords: fiber-reinforced concrete, low-modulus fiber, synthetic fiber, hybrid fiber-reinforcement, strength, durability.

Бетон и железобетон по-прежнему занимают ведущее положение в ряду основных конструктивных материалов. Вместе с тем постоянно возрастающие требования в современном строительстве все чаще превышают их потенциальные возможности и вызывают необходимость разработки новых высокофункциональных вариантов материалов с улучшенными, по сравнению с традиционными бетонами, физико-механическими характеристиками. Во многом повышенным требованиям удовлетворяет фибробетон — современный строительный композит, получивший в последние годы довольно широкое распространение [1].

Многочисленные исследования, в том числе проведенные в СПбГАСУ, определили возможности применения различных видов армирующих волокон в фибробетоне [2–7]. Так, высокомодульные волокна (чаще всего стальные) способны повысить прочностные характеристики бетона [2–4, 6], в то время как низкомодульные увеличивают его долговечность [5–7]. В ряду сравнительно новых видов армирующих волокон, появившихся в последние годы и, соответственно, малоизученных, следует назвать синтетическую макрофибру. Исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными [8–12], показали, что, несмотря на низкий по сравнению

с бетоном модуль упругости, эти волокна способны увеличить его прочность и вязкость разрушения при нагружении. При этом отмечается слабое влияние макрофибры на показатели долговечности обычного бетона, в то время как микроволокна той же природы, напротив, приводят к улучшению таких характеристик композита, как морозостойкость и водонепроницаемость, но их положительное влияние на прочность не превышает 10 %. Таким образом, для получения фибробетонов, обладающих одновременно высокой прочностью и долговечностью и отвечающих все возрастающим требованиям современного строительства, необходимо дальнейшее развитие разновидностей дисперсного армирования с учетом возможности одновременного сочетания в них различных видов армирующих волокон, обеспечивающих композиту комплекс необходимых свойств, другими словами — развитие вариантов дисперсного полиармирования.

Следует отметить, что подобные исследования уже проводятся, затрагивая, как правило, вопросы комбинирования в составе одного композита волокон различной химической природы [6, 13, 14]. В данном исследовании в качестве дисперсной арматуры рассматривались исключительно низкомодульные полипропиленовые волокна с разными геометрическими характеристиками — макроволокна *Durus S500* и микроволокна *Fibrin XT*, вид и технические характеристики которых представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таким образом, целью настоящего исследования являлась проверка выдвинутой выше гипотезы и определение эффективности дисперсного полиармирования фибробетонов комбинациями синтетических макро- и микроволокон при их различных соотношениях.

При проведении экспериментальных исследований были изготовлены образцы размером $7 \times 7 \times 28$ см с использованием указанных выше

Таблица 1

Технические характеристики волокон

Показатели	Вид армирующих волокон	
	Макроволокно <i>Durus S500</i>	Микроволокно <i>Fibrin XT</i>
Материал	Модифицированный полипропилен	Модифицированный полипропилен
Вид поверхности	Периодического профиля	Гладкая
Средняя плотность, кг/м ³	922	905
Длина, мм	48	19
Эквивалентный диаметр, мм	0,7	0,022
l/d	69	864
Прочность на растяжение, МПа	417	380
Удлинение при разрыве, %	–	–
Химическая стойкость	Высокая	Высокая
Температура плавления, °С	165	165
Температура воспламенения, °С	320	320
Модуль упругости, МПа	5740	–

Рис. 1. Использованные волокна: а — *Durus S500*; б — *Fibrin XT*

армирующих волокон и следующих сырьевых материалов для получения бетонной матрицы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства Heidelberg cement (АО «Сланцевский цементный завод «Цесла»»);

- щебень гранитный фракции 5–20 мм (истинная плотность щебня 2650 кг/м³, насыпная — 1400 кг/м³);

- песок средней крупности с модулем $M_k = 2,3$ (насыпная плотность песка 1480 кг/м³, истинная плотность 2500 кг/м³, водопотребность 5 %).

Приготовление бетонных и фибробетонных смесей осуществлялось механическим способом в смесителе СЛ-ЦБ-10. Для регулирования удобоукладываемости смесей применялась поликарбоксилатная пластифицирующая добавка «Макромер П-17». Для уплотнения смесей при изготовлении образцов применялась лабораторная виброплощадка со стандартными колебаниями. После твердения в течение 28 суток в нормальных условиях образцы подвергались

испытаниям, результаты которых приведены в табл. 2. С целью оценки эффективности полиармирования в таблицу включены результаты испытаний моноармированных фибробетонов, то есть образцов, армированных отдельно микро- или макроволокнами.

Анализ полученных данных показывает, что дисперсно полиармированные фибробетоны комплексно сочетают в себе необходимые свойства и характеристики, что является результатом присутствия и одновременного действия обоих видов синтетических волокон. При этом наибольшую эффективность демонстрируют варианты армирования, включающие 0,9 % макроволокон и 0,2 % микроволокон, а также 1,2 % макроволокон и 0,1 % микроволокон. Фибробетоны данных составов показали одновременно наиболее высокую прочность на изгиб (повышение относительно контрольных образцов составило 29 % и 34 % соответственно) и высокие показатели долговечности (водонепроницаемость

Таблица 2

Физико-механические характеристики фибробетонов, армированных низко модульными синтетическими волокнами и их комбинациями

№ п/п	Состав армирования (вид фибры, % об.)	Характеристики						
		Средняя плотность ρ_{cp} , кг/м ³	Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа	Прочность при изгибе $R_{изг}$, МПа	Марка по водонепроницаемости W	Морозостойкость		Истираемость G, см ² /г
						Относит. увеличение разности объемной деформации $\Theta \cdot 10^{-3}$	Марка F, циклов	
1	Без армирования	2346	33,9	5,44	W8	0,53	F ₃₀₀ (F ₂₂₀)	0,77
2	Durus 0,6 %	2369	36,6	5,055	W8	0,33	F ₃₀₀ (F ₃₀₀)	0,56
3	Durus 0,9 %	2379	40,7	6,61	W8	0,34	F ₃₀₀ (F ₃₁₅)	0,52
4	Durus 1,2 %	2400	43,2	7,23	W10	0,27	F ₄₀₀ (F ₃₅₀)	0,47
5	Fibrin 0,1 %	2371	37,2	4,27	W14	0,32	F ₄₀₀ (F ₃₂₀)	0,58
6	Fibrin 0,2 %	2328	36,9	4,62	W14	0,27	F ₄₀₀ (F ₃₅₀)	0,56
7	Durus 0,6 % Fibrin 0,1 %	2358	37,3	5,25	W12	0,31	F ₄₀₀ (F ₃₂₀)	0,57
8	Durus 0,6 % Fibrin 0,4 %	2307	32,7	4,98	W6	0,61	F ₃₀₀ (F ₂₀₅)	0,71
9	Durus 0,9 % Fibrin 0,1 %	2365	41,3	6,83	W12	0,30	F ₄₀₀ (F ₃₃₀)	0,51
10	Durus 0,9 % Fibrin 0,2 %	2341	41,0	7,03	W14	0,26	F ₄₀₀ (F ₃₅₅)	0,51
11	Durus 1,2 % Fibrin 0,1 %	2381	42,6	7,31	W14	0,25	F ₄₀₀ (F ₃₆₀)	0,46
12	Durus 1,2 % Fibrin 0,2 %	2372	41,3	7,11	W12	0,24	F ₄₀₀ (F ₃₇₅)	0,44

увеличилась на три марки, морозостойкость — на 64 %, стойкость к истиранию — на 59 % относительно неармированного бетона).

В процессе испытаний получены диаграммы деформирования фибробетонных образцов, некоторые из которых представлены на рис. 2.

На рисунке видно, что характер разрушения фибробетона определяется видом и количеством армирующих волокон. При этом заметное влияние на прочность и вязкость разрушения оказывают синтетические макроволокна, а расход микроволокон проявляется в незначительной степени. Силовые и энергетические характеристики разрушения исследованных полидисперсно армированных композитов, полученные в результате анализа диаграмм по методике [15], приведены в табл. 3.

Из таблицы следует, что наилучшими показателями исследуемых характеристик обладают полиармированные фибробетоны с указанными выше наилучшими вариантами сочетания макро- и микрофибры, которые, очевидно, в данной области экспериментирования следует считать оптимальными.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Дисперсное полиармирование бетона низкомо-

дульными волокнами является перспективным способом улучшения его свойств. Используя определенное сочетание волокон, можно получить композит, сочетающий в себе как повышенные прочностные характеристики, свойственные бетонам, армированным макроволокнами, так и высокие показатели долговечности, которые приобретают бетоны, армированные микроволокнами. Наиболее эффективными составами следует считать варианты армирования, содержащие 0,9 % макроволокон и 0,2 % микроволокон, а также 1,2 % макроволокон и 0,1 % микроволокон. Фибробетоны данных составов близки по своим характеристикам и показали повышение прочности на изгиб относительно контрольного состава на 29 и 34 % соответственно, повышение водонепроницаемости на три марки (от W8 до W14), морозостойкости — на 64 %, стойкости к истиранию — на 59 %. При этом следует отметить определенный синергизм, который наблюдается в системе и проявляется в том, что в полиармированных бетонах волокна способны в некоторой степени усиливать действия друг друга в сравнении с моноармированными составами. Это проявляется, к примеру, в улучшении характеристик морозостойкости или истираемости относительно моноармированных образцов.

Рис. 2. Диаграммы разрушения полидисперсно армированных образцов

Таблица 3

Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости полиармированных фибробетонов

Показатели	Неармированный	Полиармированные фибробетоны							
		Вариант армирования (вид фибры, % об.)							
		Durus 0,6 % Fibrin 0,1 %	Durus 0,6 % Fibrin 0,4 %	Durus 0,9 % Fibrin 0,1 %	Durus 0,9 % Fibrin 0,2 %	Durus 1,2 % Fibrin 0,1 %	Durus 1,2 % Fibrin 0,2 %	Durus 1,2 % Fibrin 0,2 %	Durus 1,2 % Fibrin 0,2 %
G_i^* — условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м ²	28,3	23,12	31,17	29,12	30,01	28,18	28,12		
G_f^* — условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м ²	226	2339	2412	6811	7125	8651	8778		
K_c^* — условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа · м ^{0,5}	0,91	0,77	0,52	0,91	0,99	1,25	1,18		
Модуль упругости, МПа · 10 ³	29,8	27,3	21,0	36,3	38,1	43,7	41,1		

Библиографический список

1. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов: вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: АСВ, 2004. 560 с.

2. 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.

3. Пухаренко Ю. В., Голубев В. Ю. О вязкости разрушения фибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2008. № 3 (16). С. 80–83.

4. Пухаренко Ю. В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы. 2004. № 10 (598). С. 47–50.

5. Пухаренко Ю. В., Лезов В. Ю. Оптимизация параметров армирования мелкозернистого бетона синтетическими волокнами // Интенсификация технологических процессов в производстве сборного железобетона: Межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1988. С. 24–27.

6. Кострикин М. П. Повышение эффективности дисперсного армирования путем комбинирования высоко- и низко модульных волокон // Актуальные проблемы строительства: 69-я Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. В 3 ч. Ч. 2. СПб.: СПбГАСУ, 2016. С. 305–308.

7. Кострикин М. П. Влияние дисперсного армирования на долговечность цементных бетонов для дорожного строительства // Актуальные проблемы строительства: 70-я Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПб.: СПбГАСУ, 2017. С. 102–106.

8. Смирнова О. М. Влияние дисперсного армирования синтетическим макроволокном на прочность дорожного бетона // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2016. Т. 2, № 3. С. 15–19.

9. Смирнова О. М., Харитонов А. М. Прочностные и деформативные свойства фибробетона с макрофиброй на основе полиолефинов // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 44–49.

10. Кострикин М. П. Характер и степень взаимодействия синтетической макрофибры с цементным камнем // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 116–120.

11. Rosidawani, Iswandi Imran, Saptahari Sugiri, Ivindra Pane. Behaviour of macro synthetic fiber reinforced concrete columns under concentric axial compression. // Procedia Engineering. 2015. Vol. 125. Pp. 987–994.

12. Hasan M. J., Afroz M., Mahmud H. M. I. An Experimental Investigation on Mechanical Behavior of Macro Synthetic Fiber Reinforced Concrete // International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS. 2011. Vol. 11. No 03. Pp. 18–23.

13. Кострикин М. П., Пантелеев Д. А. Разработка вариантов армирования бетона различными видами фибр и их комбинациями // Актуальные проблемы строительства: материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПб.: СПбГАСУ, 2014. С. 206–210.

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

15. Пухаренко Ю. В., Жаворонков М. И., Пантелеев Д. А. Совершенствование методов определения силовых и энергетических характеристик тре-

щиностойкости фибробетона // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, № 3 (126). С. 301–310.

References

1. Rabinovich F. N. *Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov: voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktivnykh* [Composites based on dispersed reinforced concrete: issues of theory and design, technology, construction]. Moscow, ASV Publ., 2004, 560 p.
2. Pukharens Yu. V., Pantelev D. A., Zhavoronkov M. I. *Opreделение vkladа fibry v formirovaniye prochnosti stalefibrobetona* [Determination of fiber contribution in creation of the strength of steel fiber reinforced concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 1 (60), pp. 172–176.
3. Pukharens Yu. V., Golubev V. Yu. *O vyazkosti razrusheniya fibrobetona* [On crack resistance of fiber concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2008, no. 3 (16), pp. 80–83.
4. Pukharens Yu. V. *Printsipy formirovaniya struktury i prognozirovaniye prochnosti fibrobetonov* [Principles of structure formation and prediction of the strength of fiber-reinforced concrete]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2004, no. 10 (598), pp. 47–50.
5. Pukharens Yu. V., Lezov V. Yu. *Optimizatsiya parametrov armirovaniya melkozernistogo betona sinteticheskimi voloknami* [Optimization of parameters of reinforcement of fine-grained concrete with synthetic fibers]. *Mezhvuz. temat. sb. tr. «Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v proizvodstve sbornogo zhelezobetona»* [Inter-higher-school thematic coll. works “Intensification of technological processes in the production of precast concrete”]. Leningrad, LISI Publ., 1988, pp. 24–27.
6. Kostrikin M. P. *Povysheniye effektivnosti dispersnogo armirovaniya putem kombinirovaniya vysoko- i nizkomodul'nykh volokon* [Improving the efficiency of dispersed reinforcement by combining high- and low-modulus fibers]. *Trudy 69-oi Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i doktorantov «Aktual'nye problemy stroitel'stva»* [Proceedings of the 69-th International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates, young scientists and doctoral students “Actual problems of construction”]. In 3 parts. Pt. 2. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2016, pp. 305–308.
7. Kostrikin M. P. *Vliyaniye dispersnogo armirovaniya na dolgovechnost' tsementnykh betonov dlya dorozhnogo stroitel'stva* [The influence of dispersed reinforcement on the durability of cement concretes for road construction]. *Trudy 70-oi Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i doktorantov «Aktual'nye problemy stroitel'stva»* [Proceedings of the 70-th International scientific and practical conference of students, postgraduates, young scientists and doctoral students “Actual problems of construction”]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2017, pp. 102–106.
8. Smirnova O. M. *Vliyaniye dispersnogo armirovaniya sinteticheskimi makrovoloknom na prochnost' dorozhnogo betona* [Influence of dispersed reinforcement with synthetic macro-fiber on the strength of road concrete]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii – Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 15–19.
9. Smirnova O. M., Kharitonov A. M. *Prochnostnyye i deformativnyye svoystva fibrobetona s makrofibray na osnove poliolefinov* [Strength and deformation properties of fiber reinforced concrete with macro-fiber based on using polyolefin]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2018, no. 12, pp. 44–49.
10. Kostrikin M. P. *Kharakter i stepen' vzaimodeystviya sinteticheskoy makrofibrы s tsementnym kamnem* [The characteristics and extent of interaction of synthetic macro fiber with cement stone]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 4 (69), pp. 116–120.
11. Rosidawani, Iswandi Imran, Saptahari Sugiri, Ivindra Pane. Behaviour of macro synthetic fiber reinforced concrete columns under concentric axial compression. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 125, pp. 987–994.
12. Hasan M. J., Afroz M., Mahmud H. M. I. An Experimental Investigation on Mechanical Behavior of Macro Synthetic Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, 2011, vol. 11, no. 03, pp. 18–23.
13. Kostrikin M. P., Pantelev D. A. *Razrabotka variantov armirovaniya betona razlichnymi vidami fibr i ikh kombinatsiyami* [Development of concrete reinforcement options with various types of fibers and their combinations]. *Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i doktorantov «Aktual'nye problemy stroitel'stva»* [Proceedings of the International scientific and practical conference of students, postgraduates, young scientists and doctoral students “Actual problems of construction”]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2014, pp. 206–210.
14. Pantelev D. A. *Deformativnyye i prochnostnyye kharakteristiki poliarmirovannogo fibrobetona* [Deformation and strength characteristics of poly-reinforced fiber concrete]. *Izvestiya KGASU – Bulletin of KGASU* 2015, no. 3 (33), pp. 133–139.
15. Pukharens Yu. V., Zhavoronkov M. I., Pantelev D. A. *Sovershenstvovaniye metodov opredeleniya silovykh i energeticheskikh kharakteristik treshchinostoykosti fibrobetona* [Improvement of methods for determining the power and energy characteristics of the crack resistance of fiber concrete]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2019, vol. 14, no. 3 (126), pp. 301–310.