

УДК 691.328

РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИЙ ФІБРОБЕТОН ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИМ ДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ

REACTIVE POWDER FIBER-REINFORCED CONCRETE WITH COMPOSITE DISPERSED REINFORCEMENT

Бордюженко О.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3686-5121, Савицький В.В., к.т.н., доцент, ORCID 0000-0001-8807-9486, Гнатишин Б.І., магістрант, Виховський Д.О., магістрант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Bordiuzhenko O., candidate of technical sciences, associate professor, Savitsky V., candidate of technical sciences, associate professor, Gnatyshyn B., undergraduate Vykhovskij D., undergraduate (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Наведено результати досліджень міцнісних властивостей реакційно-порошкових фібробетонів із композиційним дисперсним армуванням. Запропоновані оптимальні склади фібробетонів, що включають сталеві та базальтові дисперсні волокна.

The paper is a theoretical study of reactive powder fiber-reinforced concrete with composite disperse reinforcement with improved characteristics. On the basis of the an analytical review of literary sources the hypothesis about the possibility of preventing fiber-reinforced concrete mixing and enhancing the uniformity of the structure of fiber-reinforced concrete due to the composition of disperse reinforcement with application in the optimal ratio of steel and basalt fibers for obtaining high-strength dispersed reinforced concrete with improved operational properties is formulated.

The effectiveness of using a basalt fiber with a length of 12 mm in a complex with a wavy steel fiber, in optimal proportions is established.

The technology and compositions of effective polydispersed fiber- reinforced concrete with using of steel and basalt fiber have been developed, with improved properties by increasing the homogeneity of the structure and significantly reducing the stratification of fiber concrete mixtures. It is shown that the use of steel wavy and basalt fibers in optimal ratios makes it possible to obtain reactive powder fiber-reinforced concrete with a compressive strength of up to 100 MPa and a flexural tensile strength of up to 20 MPa. Polydispersed fiber reinforced concrete using steel and polypropylene fiber was also investigated. The use as a component of composite disperse reinforcement of polypropylene fiber gives a slightly worse effect than basalt fibers. This is

primarily due to the poorer distribution of polypropylene fibers in the concrete structure, which does not contribute to a uniform distribution of steel fibers.

Ключові слова:

Фібробетон, склад, композиційне дисперсне армування, фібра міцність.
Fiber-reinforced concrete, composite dispersed reinforcement, fiber, strength.

Вступ. Однією із сучасних тенденцій в будівництві є використання реакційно-порошкових фібробетонів. Реакційно-порошкові бетони є найзручнішою матрицею для отримання фібробетонів. У них відсутній крупний заповнювач, що сприяє рівномірному розподілу фібри в структурі бетону, а також унеможливорює її скупчення між зернами щебеню.

Аналіз останніх досліджень. Використання дисперсного армування бетонів передбачає, як правило, варіант моно армування [1], при якому керування властивостями фібробетону до певної міри обмежене. Найбільшого позитивного ефекту в плані поліпшення структури і властивостей фібробетонів можна досягти в результаті полідисперсного або композиційного дисперсного армування (армування одночасно декількома видами волокон з різними характеристиками), що дає можливість управляти широким комплексом властивостей в одному композиційному матеріалі[2-6].

Перевагами композиційного дисперсного армування (поліармування) можуть бути:

- забезпечення більшої однорідності структури фібробетону, що в свою чергу створить передумови для досягнення більших значень міцності, ніж у випадку моноармування;
- уникнення або суттєвого зменшення розшарування фібробетонної суміші в процесі її приготування, транспортування та укладання;
- цілеспрямоване регулювання комплексу фізико-механічних властивостей фібробетону в більш широких межах, ніж при моноармуванні;
- можливість покращення показників довговічності та експлуатаційних характеристик фібробетону.

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що питання композиційного дисперсного армування бетонів, особливо комбінацією "стальна фібра – базальтова фібра" вивчене на сьогодні не достатньо.

Постановка мети і задач досліджень. Метою досліджень є визначення впливу факторів складу реакційно-порошкових фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням на їх міцнісні властивості. Відповідно до мети, задачами досліджень є визначення залежності міцності фібробетону від вмісту та виду дисперсних волокон при різних їх комбінаціях а також встановлення оптимального складу полідисперсно армованого фібробетону.

Методика досліджень. Для визначення можливості одержання полідисперсно армованого реакційно-порошкового фібробетону (РПФБ) з використанням сталеві та базальтової (поліпропіленові) фібри із

забезпеченням рівномірності їх розподілу в одержуваній структурі, були виготовлені серії поліармованих фібробетонних зразків. За базовий був прийнятий наступний склад реакційно-порошкового фібробетону, кг/м³: портландцемент СЕМ І 42,5 – 700, пісок кварцовий (0,16...1,25 мм) – 1130, зола Бурштинської ТЕС ($S_{\text{пит}} = 250 \text{ м}^2/\text{кг}$) – метакаолін високоактивний ($S_{\text{пит}} = 1100 \text{ м}^2/\text{кг}$). В/Ц суміші складало 0,27. Необхідна рухомість суміші 23...25 см досягалася за рахунок введення добавки полікарбоксилатного суперпластифікатора Melflux 2651f.

Використовували сталеву мікрофібру (довжина 13 мм, діаметр 0,25 мм) в кількостях 120 і 200 кг/м³ бетону. Для отримання поліармованої композиції використовували базальтову фібру довжиною 12 і 24 мм та поліпропіленову фібру довжиною 12 та 18 мм. При цьому вміст базальтової фібри змінювався в межах від 0 до 6 кг/м³, а поліпропіленової – від 0 до 2 кг/м³.

Приготування фібробетону із композиційним дисперсним армуванням проводили в такій послідовності. У розчин пластифікатора вводили базальтову або поліпропіленову фібру і перемішували в лабораторному змішувачі з вертикальним валом протягом 40...50 с. Після розпушення волокна додавали цемент, золу і метакаолін та знову здійснювали перемішування до отримання однорідної суспензії. Потім в отриману суспензію додавали пісок відповідно до прийнятого дозування. На останньому етапі, при безперервному перемішуванні суміші, вводилася необхідна кількість сталевої фібри. Така технологія приготування дозволила виключити комкування волокон і забезпечити необхідну однорідність композиційного дисперсноармованого бетону.

Результати досліджень. В табл. 1 представлені результати визначення міцності РПФБ на основі сталевої та базальтової фібри при різних комбінаціях полідисперсного армування.

Як слідує з даних табл. 1, введення базальтової фібри позитивно впливає перш за все на міцність на розтяг при згині. Міцність $f_{c,tf}^7$ РПФБ контрольного складу при витраті сталевої фібри 120 кг/м³ становила 21,6 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону з базальтовою фіброю становила 26,0 МПа (при витраті 4 кг/м³ та довжині волокон 12 мм). Середнє збільшення міцності на розтяг при згині в залежності від довжини волокна та його вмісту склало від 7 до 20%.

При витраті сталевої фібри 200 кг/м³ міцність $f_{c,tf}^7$ фібробетону контрольного складу склала 27,9 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону з становила 31,3 МПа (при витраті базальтової фібри 4 кг/м³ та довжині волокон 12 мм). Таким чином, максимальне зростання міцності склало 12%. Менше зростання міцності в цьому випадку очевидно можна пояснити досягненням значень загального об'ємного вмісту волокон, що відповідають максимально можливому вмісту.

Таблиця 1

Міцність фібробетонних зразків з різним вмістом та співвідношенням
сталеві та базальтової фібри

Витрата сталеві фібри, кг/м ³	Витрата базальтової фібри, кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка базальтової фібри в загальному об'ємі армування n	Міцність при стиску у віці 7 діб f_{cm}^7 , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа
Базальтова фібра ($l = 12$ мм)					
120	0	1,54	0,00	96,8	21,6
	2	1,61	0,05	97,8	25,4
	4	1,69	0,09	100,7	26,0
	6	1,76	0,13	99,3	21,4
200	0	2,56	0,00	113,6	27,9
	2	2,64	0,03	113,1	31,1
	4	2,72	0,06	117,6	31,3
	6	2,79	0,08	111,2	24,2
Базальтова фібра ($l = 24$ мм)					
120	0	1,54	0,00	96,8	21,6
	2	1,61	0,05	100,8	23,1
	4	1,69	0,09	94,7	20,2
	6	1,76	0,13	94,2	13,7
200	0	2,56	0,00	113,6	27,9
	2	2,64	0,03	116,6	28,2
	4	2,72	0,06	107,3	25,1
	6	2,79	0,08	104,9	16,6

Використання базальтової фібри з довжиною волокон 24 мм в цілому показало гірші результати. Зафіксоване збільшення $f_{c,tf}^7$ на 7% лише при вмісті цих волокон 2 кг/м³ (при витраті сталеві фібри 120 кг/м³). При збільшенні вмісту базальтової фібри зафіксоване максимальне падіння міцності на 40%.

Зменшення міцності фібробетону, що спостерігається при збільшенні довжини використовуваних волокон обумовлено, ймовірно, зменшенням процентного вмісту волокна в площині перетину руйнування і зниженням міцності зчеплення на границі «волокно - цементна матриця». Крім того волокна довжиною 24 мм гірше розподіляються в масиві фібробетону, що позначається в подальшому на особливостях його структури.

Аналіз характеру руйнування композиційного РПФБ, армованого базальтовими волокнами довжиною 12 мм, свідчить, що руйнування бетону відбувається з досить хорошою участю волокон в роботі цементної матриці.

Розглядаючи вплив частки базальтової фібри в загальному об'ємі армування (рис. 1) варто відзначити, що її оптимальний вміст складає 2 кг/м^3 ($n = 0.07$) при витраті сталеві фібри 120 кг/м^3 і $2..4 \text{ кг/м}^3$ ($n = 0.05 \dots 0.09$) при витраті сталеві фібри 200 кг/м^3 . Подальше збільшення вмісту базальтової фібри очевидно приводить до збільшення питомої поверхні дисперсної арматури, що в свою чергу приводить до збільшення кількості води, необхідної для отримання бетонних сумішей із заданою рухомістю.

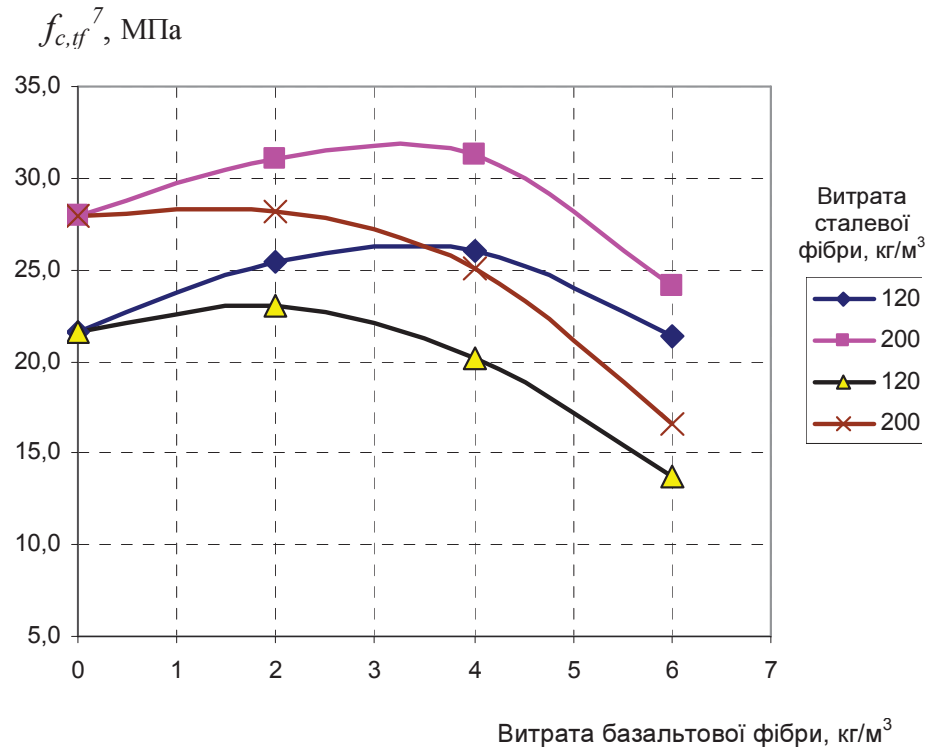


Рис. 1. Залежності міцності на розтяг при згині полідисперсно армованих РПФБ

Міцність при стиску композиційних РПФБ, очікувано мало залежить від вмісту базальтової фібри. Для різних композицій зафіксоване коливання значення міцності в середньому в межах $2 \dots 3 \%$.

Для порівняння результатів, одержаних при використанні базальтової фібри були проведені дослід з використанням поліпропіленової фібри, яка входить до групи низькомодульних волокон [7].

Як видно з результатів, наведених в табл. 2, при різних комбінаціях витрат сталеві та поліпропіленової фібри в цілому спостерігається погіршення значень міцності на розтяг при згині у порівнянні із контрольними зразками. Лише при використанні поліпропіленової фібри довжиною 12 мм та її вмісті 1 кг/м^3 зниження міцності $f_{c,tf}^7$ композиційного РПФБ майже не спостерігалось. В усіх інших випадках введення до складу композиції поліпропіленової фібри погіршувало значення міцності на розтяг при згині в середньому від 5 до 40% .

Міцність при стиску практично не змінювалась при різних варіантах композицій у досліджуваних межах.

Таблиця 2

Міцність зразків РПФБ з різним вмістом та співвідношенням сталевих та поліпропіленової фібри

Витрата сталевих фібри, кг/м ³	Витрата поліпропіленової фібри, кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка поліпропіленової фібри в загальному об'ємі армування n	Міцність при стиску у віці 7 діб f_{cm}^7 , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа
Поліпропіленова фібра ($l = 12$ мм)					
80	0	1,03	0,00	96,8	21,6
	1	1,14	0,10	96,3	21,2
	2	1,25	0,18	96,9	19,7
120	0	1,54	0,00	100,2	27,9
	1	1,65	0,07	102,3	26,7
	2	1,76	0,13	101,0	25,4
Поліпропіленова фібра ($l = 18$ мм)					
80	0	1,03	0,00	96,8	21,6
	1	1,14	0,03	94,8	20,6
	2	1,25	0,06	94,4	18,1
120	0	1,54	0,00	100,2	27,9
	1	1,65	0,07	101,0	22,3
	2	1,76	0,13	98,9	16,4

Аналізуючи отримані результати, наведені в табл. 1-2 можна зробити висновок, що використання в якості компонента композиційного армування поліпропіленової фібри дає дещо гірший ефект у порівнянні з базальтовими волокнами. Це в першу чергу можна пов'язати із гіршим розподіленням в структурі бетону поліпропіленових волокон, що не сприяє рівномірному розподіленню сталевих волокон. Дослідження структури зруйнованих зразків фібробетонів з використанням поліпропіленової фібри вказувало на ознаки неоднорідності структури, в окремих зонах спостерігались комки волокон, такі суміші при приготуванні та формуванні були більше схильні до розшарування. Також огляд характеру руйнування зразків композиційного РПФБ із поліпропіленовою фіброю вказував на гіршу адгезію поліпропілену з цементною матрицею, внаслідок чого при руйнуванні зразків спостерігалось висмикування окремих волокон.

Всі вказані вище недоліки були практично відсутні у випадку використання базальтової фібри для композиційного дисперсного армування. Очевидно, що базальтова фібра, яка за густиною та пружними характеристиками ближча до бетонної матриці ніж поліпропіленова, при оптимальній витраті та співвідношенні із сталевих фіброю утворює

своєрідний несучий каркас, який утримує сталеву фібру, попереджає розшарування суміші та сприяє рівномірному розподіленню дисперсної арматури в структурі бетону. Все це, відповідно, позначається на міцнісних характеристиках фібробетонів.

Висновки. Базальтова фібра, яка за густиною та пружними характеристиками ближча до бетонної матриці ніж поліпропіленова, при оптимальній витраті та співвідношенні із сталеву фібру утворює своєрідний несучий каркас, який утримує сталеву фібру, попереджає розшарування суміші та сприяє рівномірному розподіленню дисперсної арматури в структурі бетону. Все це, відповідно, позначається на міцнісних характеристиках фібробетонів

1. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони / Дворкін Л.Й., Бабич Є.М., Житковський В.В., Бордюженко О.М. та ін. Рівне: НУВГП, 2017. 331 с.

Vysokomitsni shvydkotverdnuchi betony ta fibrobetony / Dvorkin L.I., Babych Ye.M., Zhytkovskyi V.V., Bordiuzhenko O.M. ta in. Rivne: NUVHP, 2017. 331 s.

2. Ключев СВ., Лесовик Р.В., Ключев А.В., Бондаренко Д.О. К вопросу применения нескольких видов фибр для дисперсно армированных бетонов. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2012. № 94. С. 81–83.

Klyuev SV., Lesovik R.V., Klyuev A.V., Bondarenko D.O. K voprosu primeneniya neskolkih vidov fibr dlya dispersno armirovannyh betonov. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2012. № 94. S. 81–83.

3. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У. Полидисперсное армирование строительных композитов–фібробетонів. *Технологии бетонов*. 2011, №1–2. С. 28–29.

Puharenko Yu.V., Aubakirova I.U. Polidispersnoe armirovanie stroitelnyh kompozitov–fibrobetonov. *Tehnologii betonov*. 2011, №1–2. S. 28–29.

4. Голанцев В.А. Свойства и особенности полиармированных фибробетонів: дис. ... канд. техн. наук / Л., 1990. 214 с.

Golancev V.A. Svoystva i osobennosti poliarmirovannyh fibrobetonov: dis. kand. tehn. nauk / L., 1990. 214 s.

5. Manu P.P, Eldhose Cheriyan. Flexural behaviour of hybrid steel basalt fibre reinforced concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume: 06, Issue: 05, May 2019. P.760-764.

6. Rooban Chakravarthy Srikanth Venkatesan, and Indubhushan Patnaikuni. Review on Hybrid Fiber Reinforced High Performance High Volume Flyash Concrete. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research* Vol.5, No. 1. February 2016. P.39-42.

7. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2002. 500 с.

Bazhenov Yu.M. Tehnologiya betona. M.: ASV, 2002. 500 s.