



Дворкін Л. Й.



Бордюженко О.М.



Ковальчук Т. В.

Дворкін Л. Й., д.т.н., професор,
зав. кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства,
e-mail: dvorkin-oleg@mail.ru, моб.тел.: +38 (068) 353 33 38,
Бордюженко О. М., к.т.н., доцент,
e-mail: bord@nuwm.edu.ua, моб.тел.: +38 (063) 467 69 79,
Ковальчук Т. В., аспірант,
e-mail: koval1225@gmail.com, моб.тел.: +38 (096) 458 31 74,
Національний університет водного господарства
та природокористування,
вул Соборна, 11, м. Рівне, 33028,

L. Dvorkin, Doctor of technical sciences, Professor, Head of
Department «Technology of Building Products and Material Science»,
e-mail: dvorkin-oleg@mail.ru, tel.: +38 (068) 353 33 38,
O. Bordiuzhenko, Ph.D, Associate professor
e-mail: bord@nuwm.edu.ua, tel.: +38 (063) 467 69 79,
T. Kovalchuk, Postgraduate student
e-mail: koval1225@gmail.com, tel.: +38 (096) 458 31 74,
National University of Water and Environmental Engineering
st. Soborna, 11, Rivne, 33028,

ВПЛИВ ВИДУ СТАЛЕВОЇ ФІБРИ НА МІЦНІСНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕФІБРОБЕТОНІВ ВЛИЯНИЕ ВИДА СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛЕФИБРОБЕТОНОВ INFLUENCE OF STEEL FIBER TYPE ON THE STRENGTH PROPERTIES OF STEEL-FIBER CONCRETES

Анотація. В статті наведено результати досліджень по вивченню впливу сталевих фібри на міцнісні властивості сталевих фібробетонів. Проаналізовано вплив факторів складу, зокрема водоцементного відношення та витрати цементу. Запропоновано вибір виду фібри на основі коефіцієнту ефективності дисперсного армування.

Ключові слова: сталеві фібробетон, фібра, математична модель, міцність, коефіцієнт ефективності.

Анотация. В статье приведены результаты исследований по изучению влияния стальной фибры на прочностные свойства сталефибробетониров. Проанализировано влияние факторов состава, в частности водоцементного отношения и расхода цемента. Предложен выбор вида фибры на основе коэффициента эффективности дисперсного армирования.

Ключевые слова: сталефибробетон, фібра, математическая модель, прочность, коэффициент эффективности.

Annotation. The article represents results of researches of the influence of steel fiber on the strength properties of steel-fiber concretes. The influence of the water-cement ratio and cement consumption are analyzed. A selection of the type of fiber based on the coefficient of efficiency of the particulate reinforcement is proposed.

Keywords: steel-fiber concrete, fiber, mathematical model, strength, coefficient of efficiency.

Постановка проблеми

Загальносвітові тенденції розвитку будівництва показують зростання обсягів використання фібробетонів, в т.ч. високоміцних, в конструкціях будівель та споруд різного призначення. Дисперсне армування бетону фіброю дозволяє істотно підвищити його питому міцність, особливо на розтяг і згин, тріщинотійкість, стійкість до ударних і вібраційних впливів, опір стиранню тощо.

Велике різноманіття видів фібри, що застосовуються, породжує проблему вибору її оптимального виду з метою забезпечення заданих фізико-механічних показників фібробетонів, у першу чергу міцнісних.

Аналіз досліджень та публікацій

Найбільш поширені фібробетони на портландцементі, армовані сталевим волокном – сталеві фібробетони. Відомо, що найефективнішим є використання таких видів бетонів в залізобетонних конструкціях для підвищення їх тріщинотійкості, в тонкостінних конструкціях, в спорудах, що працюють на ударні навантаження (хвилерізах, молах, в покриттях аеродромів, автомобільних доріг, фортифікаційних спорудах, в сейсмостійких конструкціях, палях, трубах, резервуарах, які піддаються впливу агресивного середовища) [1-3].

До недавнього часу практично застосовувались переважно сталеві фібробетони звичайних класів (до В50... В60), і лише в останні роки з'явилися дослідження по високоміцних сталеві фібробетонах (класи за міцністю понад В60), що призвело до їх широкого використання, зокрема

у висотному будівництві. На практиці звичайно достатнім є отримання «помірно» високоміцних бетонів (80...100 МПа), які при достатніх для більшості задач характеристиках, є економічно ефективними а також володіють відносно високою ранньою міцністю, що дозволяє суттєво розширити сферу їх використання.

На ринку є досить велика кількість видів сталевих фібри, що відрізняються геометричними характеристиками й способами анкерування волокон у матриці. Дані досліджень щодо впливу виду, профілю, способу анкерування на міцнісні показники сталеві фібробетонів є досить суперечливі. В одних випадках відзначається перевага сталевих фібри із анкерами на кінцях (гнуті кінці) [4-5], в інших – хвилястого профілю [6]. Загальним у всіх випадках є відзначення важливості забезпечення високої міцності зчеплення дисперсної арматури з бетоном за рахунок як механічного так і адгезійного зчеплення.

Також неоднозначними є літературні дані щодо впливу ступеня дисперсності армуючих волокон на міцність сталеві фібробетону. Так, у роботах [7, 8] констатується істотне збільшення міцності сталеві фібробетону при зменшенні діаметра армуючих волокон. При цьому доходять висновку про існування оптимального діаметру 0,3 мм. Відзначається також, що волокна діаметром 0,5 мм менш ефективні. За даними [9], найбільш раціональною є фібра діаметром 0,2...0,4мм. Разом з тим в [10] відзначено, що міцнісні властивості матеріалу мало залежать від діаметру армуючих волокон. В [11] запропоновано викори-

стовувати в якості характеристики фібрового армування величину:

$$K = \mu_o \frac{l}{d}, \quad (1)$$

де μ_o – коефіцієнт об'ємного армування l – довжина фібри, мм d – діаметр фібри, мм.

Експериментально встановлено, що однаковим значенням K , при інших рівних умовах, відповідають однакові значення міцності сталевібробетону незалежно від абсолютних значень діаметрів фібр. За даними авторів зазначених робіт це є наслідком збільшення коефіцієнта орієнтації $K_{ор}$ за рахунок збільшення довжини фібр і поліпшення умов їх анкеровки, зі збільшенням діаметру внаслідок надання їм періодичного профілю. На підставі проведених досліджень в [11] рекомендується для конструкцій, граничний стан яких лімітується несучою здатністю, застосовувати фібри діаметром 1,0...1,2 мм.

Мета роботи

Метою даної роботи було дослідження впливу параметрів складу при застосуванні різних поширених видів фібри на можливість отримання високоміцного сталевібробетону з відносно невеликими витратами цементу та фібри.

Основний зміст

На даний час запропонована велика кількість видів сталевіброї фібри, які відрізняються геометричними параметрами та властивостями металу, з якого вони виготовлені [12]. Найпоширенішими в Україні є різні види фібри із низьковуглецевої сталі трьох основних типів: пряма, хвилеподібна та анкерна із загнутими або сплющеними кінцями.

В дослідженнях використовували наступні види фібри (рис. 1):

- 1) хвиляста типу Fibax Ф1 60/1;
- 2) анкерна із загнутими кінцями «Dramix» компанії «Becaert» Ф2 60/1;
- 3) анкерна із сплющеними кінцями «Mixarm» Ф3 50/1;
- 4) анкерна із загнутими кінцями «Челябінка» Ф4 33/0,85/0,75;
- 5) прямолінійна фібра з анкерами у вигляді конусів «Mixarm» Ф5 54/1.

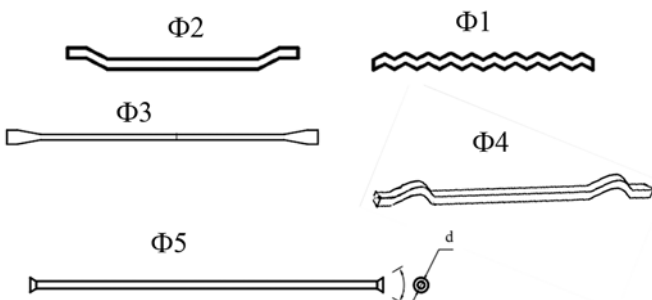


Рис. 1. Основні види та маркування фібри

Основні характеристики цих видів фібри наведені в табл. 1.

На першому етапі дослідження проводили з використанням трьох видів фібри: Ф1, Ф2 та Ф3.

Для встановлення виду фібри, що дозволяє отримати бетон з найбільш високими показниками міцності на розтяг при згині були проведені експерименти із застосуванням математичного планування [13]. Були реалізовані дві напіврепліки типу 2^{3-1} . Умови планування експериментів наведені в табл. 2.

Дослідження проводили на двох видах бетону: на звичайному важкому із застосуванням в якості крупного заповнювача щебеню 5...20 мм та дрібнозернистому із застосуванням в якості заповнювача фракційної суміші – 0,16...2 мм (кварцовий пісок) та 2...5 мм (гранітний щебінь).

В якості вихідних компонентів бетонної суміші використовували цемент ПЦ-І М500 ПАТ «Волинь-цемент», кварцовий пісок із $M_{кр}=2,1$, гранітний щебінь фракції 5...20 мм. Витрата фібри складала 40 кг/м^3 ($\mu = 0,5\%$). В бетонні суміші вводили добавку суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f.

Співвідношення піску і щебеню для звичайного важкого бетону розраховували згідно відомих рекомендацій [1]. Бетонні суміші виготовляли з однаковою рухомістю ($OK = 15 \text{ см}$).

Попередньо були проведені досліді на двох видах бетону без використання фібри (матриця). Значення міцності при стиску та на розтяг при згині для звичайного важкого і дрібнозернистого бетонів наведені в табл. 3.

Як видно з наведених даних, збільшення В/Ц з 0,35 до 0,45 зменшує міцність при стиску на 20...25% і меншою мірою міцність на розтяг при згині. Збільшення витрати цементу при одному й тому ж В/Ц слабо позначається на значеннях міцності.

В результаті реалізації двох напівреплік (табл. 2) та статистичної обробки експериментальних даних отримані поліноміальні моделі виду:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2.$$

Коефіцієнти математичних моделей міцності при стиску та при згині для звичайного важкого бетону наведені в табл. 4.

На рис. 2 наведені графічні залежності, що отримані відповідними розрахунками по моделях, які характеризують залежність міцності бетону на розтяг при згині ($f_{ct,tf}$) і стиску (f_{cm}) у віці 1 та 28 днів від В/Ц при використанні різних видів сталевіброї фібри.

Аналіз математичних моделей та графічних залежностей дозволяє зробити висновок, що найвищі значення міцності як при стиску і, особливо, при згині досягаються при використанні фібри хвилястого профілю Ф1. Це, очевидно, можна пояснити збільшеною поверхнею зчеплення такої фібри з розчином у порівнянні із анкерною фіброю.

Збільшення водоцементного відношення приводить до зменшення міцності у всі строки, причому більшою мірою міцності при стиску (на 20...30%).

Збільшення витрати цементу при постійному В/Ц очіку-

Таблиця 1.

Види фібри: основні характеристики (згідно EN 14889-1, ТУ У В.2.7-28.7-00191046-015:2007)

Основні показники	Вид фібри				
	Хвилеподібна Ф1 60/1	Анкерна із загнутими кінцями Ф2 60/1	Анкерна зі сплющеними кінцями Ф3 50/1	Анкерна із загнутими кінцями Ф4 33/0,85/0,75	Прямолінійна фібра з анкерами у вигляді конусів Ф5 54/1
Довжина (L), мм	60,0 ± 6,0	60,0 ± 6,0	50,0 ± 5,0	33,0 ± 3,0	54,0 ± 4,0
Діаметр (d), мм	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	0,9*	1,0 ± 0,03
$\lambda = L/d$	60	60	50	37	54
Тимчасовий опір розриву, МПа не менше	1335	1335	1335	1260	1100
Довжина загнутого/сплющеного кінця, мм	-	5,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,0 ± 0,1
Висота хвилі/ загнутого кінця, мм	4,5 ± 0,1	5,0 ± 0,1	-	5,0 ± 0,1	-
Середня густина сталі (ρ), г/см ³	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86

* Еквівалентний діаметр

Умови планування експериментів при виборі виду фібри

Фактори впливу		Рівні варіювання факторів	
Натуральний вид	Кодований вид	-1	+1
Вид фібри	X1	Анкерна *	хвилеподібна
Водоцементне відношення	X2	0,35	0,45
Вміст цементу, кг/м ³	X3	500	600

*- в першій напіврепліці була застосована анкерна фібра із загнутими кінцями Ф2, а в другій – зі сплющеними кінцями Ф3.

Таблиця 3.

Значення міцності бетонів залежно від витрати цементу та В/Ц

В/Ц	Витрата цементу	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа
Важкий бетон					
0,35	500	3,1	75,8	3,7	80,3
0,35	600	3,0	69,5	3,8	82,1
0,45	500	2,5	63,8	3,2	68,1
0,45	600	2,9	65,3	3,1	73,3
Дрібнозернистий бетон					
0,35	500	3,1	61,1	4,0	73,9
0,35	600	4,2	64,3	4,3	76,3
0,45	500	3,5	43,6	3,6	58,8
0,45	600	3,0	48,1	3,8	63,9

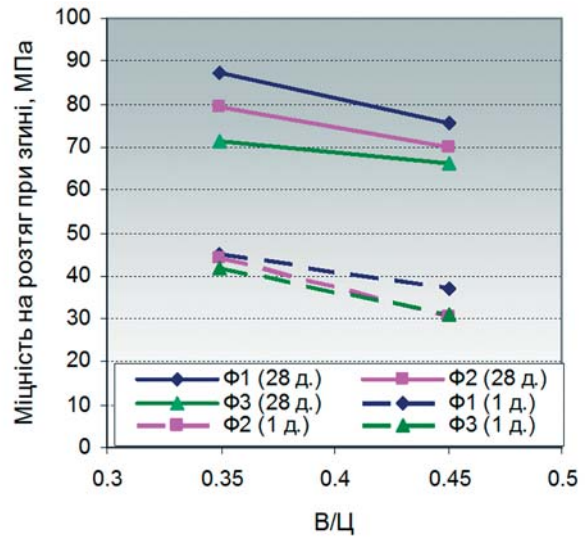
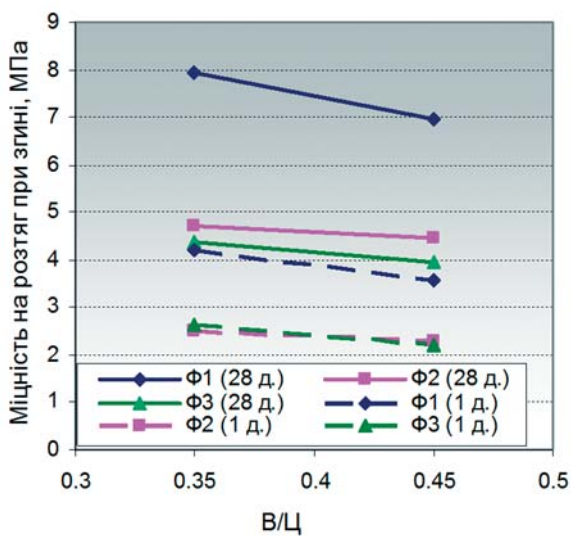


Рис. 2. Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску сталевібробетону у віці 1 та 28 діб від В/Ц

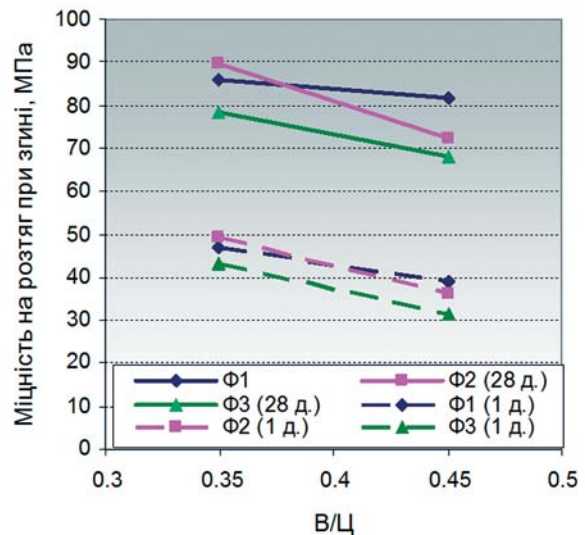
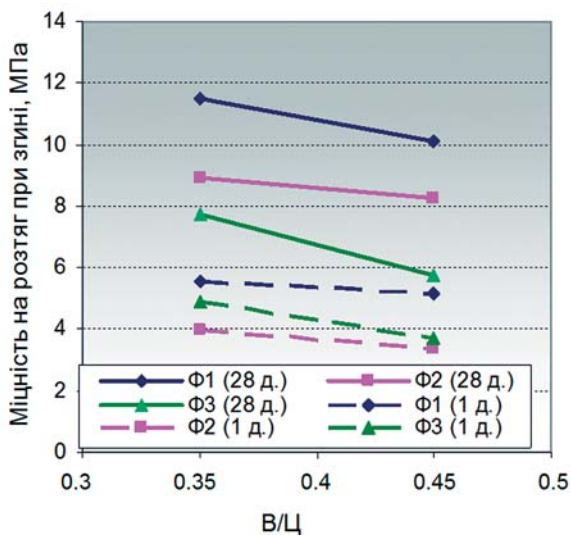


Рис. 3. Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону у віці 1 та 28 діб від В/Ц

Коефіцієнти математичних моделей міцності з порівнянням видів фібри для звичайного важкого бетону

Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	3,26/2,98	-1,37/-1,21	-0,2/-0,1	0,05/0,03	2,4/0,56
Міцність на стиск у віці 1 доба, МПа	38,2/39,1	-1,5/-2,3	-3,6/-2,1	0,9/2,5	0,3/1,1
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	4,55/4,48	-1,25/-1,33	-0,1/-0,2	0,1/0,03	0,1/0,03
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	6,0/5,78	-1,4/-1,63	-0,3/-0,3	0,2/0,18	0,2/0,18
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	62,3/64,3	-2,25/-0,25	-6,8/-3,8	-2,3/0,75	-2,3/0,75
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	77,3/74,8	-3,5/-6	-5,3/-4,3	0,5/1,5	0,5/1,5

*- над ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилеподібної Ф1 та анкерної фібри із загнутими кінцями Ф2; під ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилеподібної Ф1 та анкерної фібри зі сплющеними кінцями Ф3

Таблиця 5.

Коефіцієнти математичних моделей міцності з порівнянням видів фібри для дрібнозернистого бетону

Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	5,3/4,84	-1,65/-2,05	-1,2/-1,3	0,6/0,22	1,6/0,18
Міцність на стиск у віці 1 доба, МПа	40,3/41,7	-1,3/-1,8	-4,3/-3,3	0,4/0,8	0,5/1,2
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	7,32/6,8	-2,3/-1,7	-1,1/-1,3	0,15/0,2	0,15/0,9
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	10,2/11,3	-2,1/-0,8	-0,9/-1,2	0,3/0,4	0,26/-0,3
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	64,1/64,9	-1,35/-0,25	-5,7/-4,1	1,2/0,95	1,1/0,9
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	80,1/77,8	-2,2/-5,1	-4,2/-3,2	0,9/1,2	3,5/0,8

*- над ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилеподібної Ф1 та анкерної фібри із загнутими кінцями Ф2; під ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилеподібної Ф1 та анкерної фібри зі сплющеними кінцями Ф3.

вано приводить до зростання міцності, однак вплив даного фактору в межах області варіювання факторів можна вважати несуттєвим.

Коефіцієнти математичних моделей міцності при стиску та при згині для дрібнозернистого бетону приведені в табл. 5.

На рис. 3 наведені графічні залежності, що отримані відповідними розрахунками по моделях, які характеризують залежність міцності дрібнозернистого бетону на розтяг при згині ($f_{c,tf}$) і стиску (f_{cm}) у віці 1 та 28 діб від В/Ц при використанні різних видів сталевих фібри.

Аналіз математичних моделей (табл. 5) та графічних залежностей (рис. 3) дозволяє зробити висновок, що міцність дрібнозернистого фібробетону у всі строки залежить від факторів впливу схожим чином, як і для звичайного важкого бетону. В той же час абсолютні значення міцності на розтяг при згині є суттєво вищими у порівнянні із звичайним важким бетоном (на 40...

50%), що можна пояснити збільшенням площі поверхні контакту фібри із розчиновою матрицею дрібнозернистого бетону. Міцність при стиску зростає несуттєво в межах 5...10% залежно від виду фібри та віку зразків.

Найвищі значення міцності знову таки ж досягаються при використанні фібри хвилястою профілю Ф1. Однак найбільш яскраво ця залежність проявляється при визначенні міцності на розтяг при згині, в той час, як для міцності при стиску при низьких значеннях В/Ц спостерігається навіть незначне переважання фібри типу Ф2 (рис. 3).

Збільшення водоцементного відношення приводить до зменшення міцності у всі строки, причому більшою мірою міцності при стиску.

Розглядаючи кінетику зростання міцності сталеві фібробетонів (звичайних і дрібнозернистих) у часі, можна відзначити, що її значення у віці 1 доба складає 50...60% від 28-добового

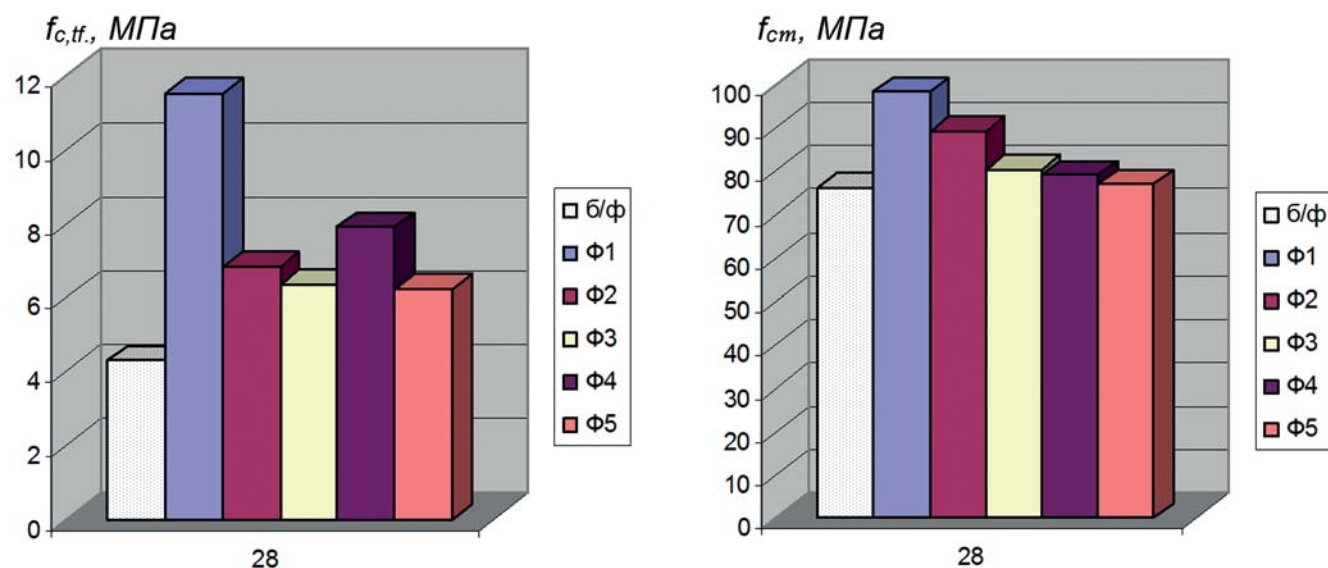


Рис. 4. Вплив виду фібри на значення міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталеві фібробетону у віці 28 діб ($\mu = 0,5\%$)
* б/ф – без фібри

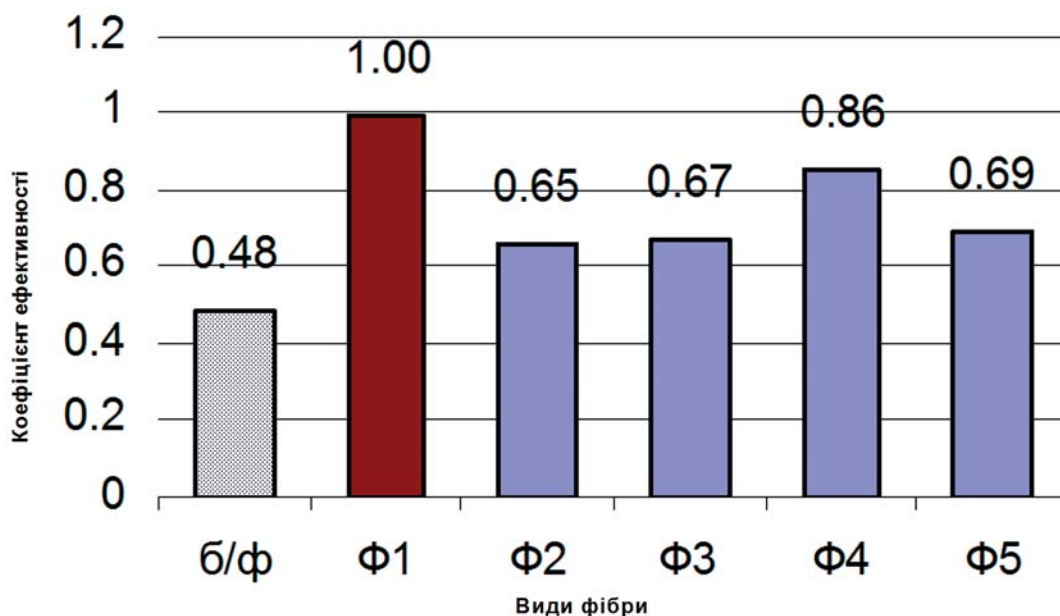


Рис. 5. Значення коефіцієнта ефективності дисперсного армування (співвідношення $f_{c,tf} / f_{cm}$) при використанні різних видів фібр для дрібнозернистого бетону

значення, а у віці 7 діб – близько 80%.

Перший етап дослідження показав більш ефективним використання хвилястої фібри типу Ф1. Для порівняння ефективності дисперсного армування на ще двох видах фібри, а саме анкерної із загнутими кінцями (Ф4) та прямолінійної з анкерами у вигляді конусів (Ф5) на другому етапі було проведено ряд окремих дослідів. Сталефібробетонні зразки виготовлялися на дрібнозернистих сумішах з В/Ц = 0,35 та при витраті цементу 500 кг/м³.

Порівняльні діаграми міцності для зразків з використанням всіх видів фібри та без неї наведено на рис. 4.

Як видно з одержаних результатів, анкерна фібра із загнутими кінцями «Челябінка» (Ф4) показала суттєвий приріст міцності на розтяг при згині у порівнянні із базовим складом, особливо для дрібнозернистого бетону, але в той же час значно поступається хвилястій фібрі Ф1. Фібра Ф5 показала результати на рівні досліджених раніше видів фібри Ф3 та Ф4.

Очевидно, основний ефект від дисперсного армування бетонів проявляється у збільшенні співвідношення $f_{c,tf} / f_{cm}$. Це можна явно прослідкувати з рис. 5, на якому відображені коефіцієнти ефективності дисперсного армування різними видами фібри для дрібнозернистого бетону.

За одиницю прийняте співвідношення $f_{c,tf} / f_{cm}$ для дрібнозернистого фібробетону з використанням фібри Ф1. Для всіх видів фібри коефіцієнт ефективності є суттєво більшим ніж для бетону, не армованого фіброю.

Висновки

1. Фібра хвилястого профілю є найбільш ефективною в плані збільшення міцності сталефібробетонів (особливо на розтяг при згині). Коефіцієнт ефективності дисперсного армування такого виду фібри більший відносно інших розглянутих видів на 15...30%.

2. Встановлено вплив факторів складу (водоцементне відношення та витрати цементу) на міцнісні властивості сталефібробетонів при використанні різних видів фібри.

3. Проведені дослідження показали можливість одержання сталефібробетонів із порівняно невисокими витратами цементу та фібри ($\mu = 0,5\%$), що мають достатньо високі значення міцності на стиск (80...100 МПа) та міцності на розтяг при згині (до 12 МПа).

Література:

1. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін // – К.: Основа, 2007. – 616 с.
2. Рабинович, Ф.Н. Композити на основі дисперсно армування бетонів. Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции. Монография. – М.: Изд. АСВ, –2006. – 560 с.
3. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete // Concrete Society Technical Report. – 2007. – pp.92.
4. Пухаренко, Ю.В. Высокопрочный сталефибробетон / Ю. В. Пухаренко, В. Ю. Голубев // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – №9. – С. 40-41.
5. Дорф В.А. Влияние содержания и характеристик фибры на коэффициент истираемости сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей / В.А. Дорф, Красновский // Технологии бетонов. – 2013. – №12. – С. 40-42.
6. Ключев С.В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – №8. – С. 61-66.
7. Аболиньш Д. С. Сопротивление фибробетона изгибу и растяжению / Аболиньш Д. С., В. К. Кравинскис // Расчет и оптимизация строительных конструкций. – Рига, 1974. – С. 47-54.
8. Прочность на излом бетона, армированного волокнами. Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М. – 1980. – Вып. 10. – С. 4-6.
9. Павленко В. И. Свойства фибробетона и перспективы его применения: анализ. обзор. / В. И. Павленко, В. Б. Арончик; Латв. Респ. ин-т науч.-техн. информ. и пропаганды. – Рига, 1978. – 96 с.
10. Рыбасов В. П. Исследование свойств бетона, армированного стальными волокнами / В. П. Рыбасов // Новые материалы и изделия в строительстве. – М., 1982. – С. 36-38.
11. Курбатов Л. Г. Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами / Л. Г. Курбатов, Ф. Н. Рабинович // Бетон и железобетон. – 1980. – №3. – С. 6-8.
12. BS EN 14889-1:2006 – Фібра для бетонів. Стальна фібра. Позначення, специфікація, конфігурація.
13. Дворкін Л. Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін // – Рівне: НУВГП, 2011 – 174 с.