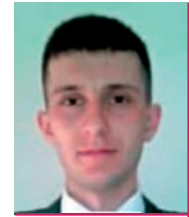




Дворкін Л. Й.



Бордюженко О. М.



Ковальчук Т. В.

Дворкін Л. Й., д.т.н., професор, зав. кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства,
☎ +38(068)3533338 ✉ dvorkin.leonid@gmail.com
Бордюженко О. М., к.т.н., доцент,
☎ +38(063)4676979 ✉ bord@nuwm.edu.ua
Ковальчук Т. В., магістр,
☎ +38(096)4583174 ✉ koval1225@gmail.com
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»,
☎ +38(068)3533338 ✉ dvorkin.leonid@gmail.com
O. Bordiuzhenko, PhD, Associate professor,
☎ +38(063)4676979 ✉ bord@nuwm.edu.ua,
T. Kovalchuk, Master,
☎ +38(096)4583174 ✉ koval1225@gmail.com
National University of Water and Environmental Engineering
st. Soborna, 11, Rivne, 33028

ФІБРОБЕТОН З КОМПОЗИЦІЙНИМ ДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ

FIBER-REINFORCED CONCRETE WITH COMPOSITE DISPERSED REINFORCEMENT

ФИБРОБЕТОН С КОМПОЗИЦИОННЫМ ДИСПЕРСНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Анотація. В статті наведено результати досліджень властивостей фібробетонів із композиційним дисперсним армуванням, що включає сталеву та базальтову фібру. Експериментально встановлено зменшення розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування. Зафіксовано покращення структурних характеристик фібробетонів в результаті використання комбінації сталевих та базальтових волокон.

Ключові слова: фібробетон, сталева фібра, базальтова фібра, міцність, розшарування.

Summary. The article presents the results of studies of the fiber-reinforced concrete properties with composite dispersed reinforcement, including steel and basalt fiber. It has been experimentally established reduce the stratification of fiber-concrete mixtures and increase the homogeneity of fiber-reinforced concrete structure due to composite dispersion reinforcement. An improvement in the structural characteristics of fiber-reinforced concrete as a result of using a combination of steel and basalt fibers has been recorded.

Keywords: fiber-reinforced concrete, steel fiber, basalt fiber, strength, stratification.

Аннотация. В статье приведены результаты исследований свойств фибробетонов с композиционным дисперсным армированием, включающим стальную и базальтовую фибру. Экспериментально установлено уменьшение расслоения фибробетонных смесей и повышения однородности структуры фибробетонов за счет композиционного дисперсного армирования. Зафиксировано улучшение структурных характеристик фибробетонов в результате использования комбинации стальных и базальтовых волокон.

Ключевые слова: фибробетон, стальная фибра, базальтовая фибра, прочность, расслоение.

Вступ

Як правило, використання дисперсного армування передбачає варіант моноармування, при якому керування властивостями бетону до певної міри обмежене, тоді як полідисперсне або композиційне дисперсне армування (армування одночасно декількома видами волокон з різними характеристиками) дає можливість управляти широким комплексом властивостей матеріалу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проведений літературний огляд показує, що питання покращення властивостей фібробетонів та сумішей вивчалось недостатньо. Окремі дослідження проведені за напрямком використання композиційного дисперсного армування дозволяють зробити висновок про перспективність використання полідисперсного армування [1-3].

В роботі [2] показана можливість дисперсного армування з використанням сталеві та поліпропіленові фібри. Відзначається, що при оптимальному їх співвідношенні і вмісті стає можливим досягнення більшої однорідності композиту, зменшення відкритої пористості, зменшується також ймовірність комкування волокон при перемішуванні суміші.

Модель багаторівневого дисперсного армування самоущільнюваного бетону представлена в роботі [4]. Структура такого фібробетону формується на двох рівнях: на макрорівні – базальтовим волокном, на мікрорівні – за рахунок утворення волокнисто-голчастих субмікроармувальних новоутворень кристалогідратів, які підвищують опір руйнуванню при реалізації явища «самомікроармування».

Разом з тим, питання полідисперсного армування фібробетонів до теперішнього часу вивчене недостатньо, а наявна інформація часом свідчить про суперечливість отриманих результатів досліджень.

Мета роботи

Метою даної роботи було дослідження впливу параметрів складу фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням на технологічні властивості сумішей а також параметри структури та міцнісні властивості. Сформульована наукова гіпотеза полягала у можливості попередження розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування із застосуванням в оптимальному співвідношенні сталеві та базальтові фібри.

Експериментальна частина

Для визначення можливості одержання полідисперсно армованого фібробетону з використанням сталеві та базальтові фібри із забезпеченням рівномірності їх розподілу в одержуваній структурі, були виготовлені декілька серій фібробетонних зразків. За базовий був прийнятий наступний склад дрібнозернистого бетону: порландцемент – 500 кг/м³, відношення заповнювача (щебінь фракції 2...5 мм : пісок = 0,55:0,45) до цементу складало 3,6:1 (за масою). В/Ц суміші складало 0,35. Необхідна рухомість суміші 13...15 см досягалася за рахунок введення добавки суперпластифікатора Melflux 2651f.

Використовували сталеву фібру хвилястого профілю (довжина 60 мм, діаметр 1 мм) в кількостях 80 і 120 кг/м³ бетону.

Для отримання поліармованої композиції використовували модифіковану базальтову фібру ТзОВ «Технобазальт-Інвест» (м. Київ) довжиною 12 та 24 мм, виготовлену з базальтового ровінгу, при цьому її вміст у фібробетоні змінювався в межах від 0 до 6 кг/м³.

Приготування фібробетону із композиційним дисперсним армуванням проводили в такій послідовності. У розчин пластифікатора вводили базальтову фібру і перемішували в лабораторному змішувачі з вертикальним валом протягом 40-60 с. У розпушене таким чином волокно додавали цемент і знову здійснювали перемішування до отримання однорідної суспензії. Потім в отриману суспензію додавали заповнювач відповідно до прийнятого дозування. Нарешті на останньому етапі, при безперервному перемішуванні суміші, вводилася необхідна кількість просіяної крізь сито сталеві фібри. Така технологія дозволила виключити комкування волокон і забезпечити необхідну однорідність композиційного дисперсноармованого бетону.

В табл. 1 представлені результати визначення міцності фібробетонів на основі сталеві та базальтові фібри при різних комбінаціях полідисперсного армування.

Як слідує з даних табл. 1, введення базальтові фібри позитивно впливає перш за все на міцність на розтяг при згині. Міцність $f_{ct,7}$ фібробетону у віці 7 діб контрольного складу при витраті сталеві фібри 80 кг/м³ становила 10,3 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону з базальтовою фіброю становила 12,4 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 сталеві фібри 120 кг/м³ міцність $f_{ct,7}$ фібробетону контрольного складу склала 13,3 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону становила 14,9 МПа (при витраті базальтові 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.

Використання базальтові фібри з довжиною волокна 24 мм в цілому показало гірші результати. Зафіксоване збільшення $f_{ct,7}$ на 7 % лише при вмісті цих волокон 2 кг/м³ (при витраті сталеві фібри 80 кг/м³). При збіль-

шенні вмісту базальтові 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 фібробетону, армованого базальтовими волокнами довжиною 12 мм, свідчить, що руйнування бетону відбувається з досить хорошою участю волокон в роботі цементної матриці.

Розглядаючи вплив частки базальтові фібри в загальному об'ємі армування (рис. 1) варто відзначити, що її оптимальний вміст складає 2 кг/м³ ($n = 0.07$) при витраті сталеві фібри 80 кг/м³ і 2..4 кг/м³ ($n = 0.05...0.09$) при витраті сталеві фібри 120 кг/м³. Подальше збільшення вмісту базальтові фібри очевидно призводить до збільшення питомої поверхні дисперсної арматури, що в свою чергу викликає збільшення кількості води, необхідної для отримання бетонних сумішей із заданою рухомістю.

Міцність при стиску композиційних фібробетонів, очікувано мало залежить від вмісту базальтові фібри. Для різних композицій зафіксоване коливання значення міцності в середньому в межах 2...3 %.

Базальтова фібра, яка за густинною та пружними характеристиками близька до бетонної матриці при оптимальній витраті та співвідношенні зі сталеві фіброю утворює своєрідний несучий каркас, який утримує сталеві фібру, попереджає розшарування суміші та сприяє рівномірному розподіленню дисперсної арматури в структурі бетону. Все це, відповідно, позначається на міцнісних характеристиках фібробетонів.

Для вивчення процесів розшарування фібробетонних сумішей, були виконані експериментальні дослідження пов'язані із встановленням впливу вмісту сталеві та базальтові фібри та тривалості віброуцільнення на розшарування фібробетонної суміші різної рухомості.

Рівномірність розподілення сталеві фібри по об'єму бетонної суміші оцінювалася за коефіцієнтом розшарування, який визначався за рекомендованою методикою [5].

Таблиця 1.

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

Витрата сталеві фібри, кг/м ³	Витрата базальтові фібри, кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка базальтові 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 $f_{ct,7}$, МПа
Базальтова фібра (l = 12 мм)					
80	0	1,03	0,00	64,5	10,3
	2	1,10	0,07	65,2	12,1
	4	1,18	0,13	67,1	12,4
	6	1,25	0,18	66,2	10,2
120	0	1,54	0,00	66,8	13,3
	2	1,61	0,05	66,5	14,8
	4	1,69	0,09	69,2	14,9
	6	1,76	0,13	65,4	11,5
Базальтова фібра (l = 24 мм)					
80	0	1,03	0,00	64,5	10,3
	2	1,10	0,07	67,2	11
	4	1,18	0,13	63,1	9,6
	6	1,25	0,18	62,8	6,54
120	0	1,54	0,00	66,8	13,3
	2	1,61	0,05	68,6	13,45
	4	1,69	0,09	63,1	11,94
	6	1,76	0,13	61,7	7,91

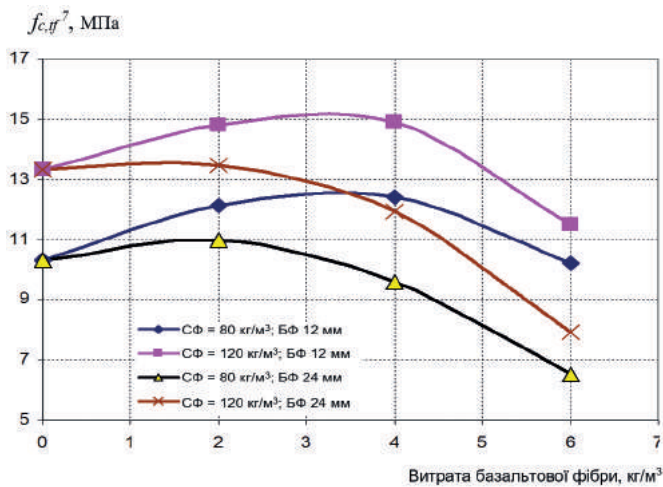


Рис. 1. Залежності міцності на розтяг при згині полідисперсноармованих фібробетонів

На першому етапі вивчали розшаровуваність сталефібробетонних сумішей при різних значеннях рухомості. Результати експериментальних досліджень коефіцієнтів розшарування дрібнозернистих сталефібробетонів наведені в табл. 2.

Отримані експериментальні результати свідчать про те, що найбільш суттєвими факторами, які впливають на коефіцієнт розшарування сталефібробетонної суміші є її рухомість, а також тривалість віброущільнення. Встановлено, що при збільшенні рухомості бетонної суміші необхідно суттєво обмежувати тривалість віброущільнення. Для забезпечення необхідного коефіцієнту розшарування, який у відповідності з [5] повинен складати не більше 0,8 для сумішей із маркою за легкоукладальністю P3 і менше та 0,75 для марок за легкоукладальністю P4 і P5, оптимальна тривалість віброущільнення складає не більше 45 секунд для сумішей, що характеризуються рухомістю 5-9 см, 15-30 секунд для сумішей з рухомістю 10-15 см та не більше 15 секунд для сумішей з рухомістю 16-21 см. Також встановлено, що збільшення вмісту сталевої фібри у досліджуваному діапазоні погіршує коефіцієнт розшарування дрібнозернистого сталефібробетону в середньому на 9% при ОК = 5-9 см, на 10...15% при ОК = 10-15 см і до 25% при ОК = 16-21 см.

На другому етапі визначали розшаровуваність фібробетонних сумішей з композиційним дисперсним армуванням при введенні базальтової фібри в кількості 2 кг/м³. Значення рухомості та тривалості віброущільнення приймали аналогічні до попереднього етапу. Результати експериментальних досліджень коефіцієнтів розшарування композиційних фібробетонних сумішей наведені в табл. 3.

Залежності коефіцієнту розшарування від тривалості віброущільнення в цілому відповідає таким же залежностям, отриманим для сталефібробетону. В той же час абсолютні значення коефіцієнту розшарування для сумішей, що містять в собі базальтову фібру, є вищими практично для всіх комбінацій рухомості і тривалості віброущільнення.

Оптимальна тривалість віброущільнення з метою забезпечення нормативних значень коефіцієнту розшарування в даному випадку складає не більше 45 секунд для сумішей, що характеризуються рухомістю 5-9 см, 30-45 секунд для сумішей з рухомістю 10-15 см та 15-30 секунд для сумішей з рухомістю 16-21 см. Порівнюючи дані табл. 2 та 3 можна зробити висновок, що можлива тривалість віброущільнення для більшості сумішей з композиційним дисперсним армуванням зросла на 1-2 діапазони. Також, якщо для звичайного сталефібробетону при витраті сталевої фібри 120 кг/м³ було неможливим забезпечення нормативних значень коефіцієнту розшарування для сумішей з рухомістю P3 та P4, то для композиційного фібробетону це вдається навіть з деяким запасом.

Загалом використання композиційного дисперсного армування на противагу моноармуванню лише сталевою фіброю дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт розшарування, що добре спостерігається на рис. 2. Якщо при рухомості суміші 5-9 см цей приріст складає 3...7% при обох витратах сталевої фібри,

то для більш рухомих сумішей позитивний вплив базальтової фібри проявляється більш яскраво і може досягати 20% для сумішей з рухомістю P3 і 35% з рухомістю P4.

Також варто відмітити, що перевага композиційного дисперсного армування проявляється сильніше в міру зростання тривалості віброущільнення та збільшення витрати сталевої фібри.

Експериментально встановлені оптимальні тривалості віброущільнення дрібнозернистого сталефібробетону та фібробетону з композиційним дисперсним армуванням дозволяють забезпечувати рівномірне розподілення сталевої фібри по об'єму фібробетону, що призводить до покращення фізико-механічних властивостей виробів і конструкцій, виготовлених на його основі.

Низький вміст досліджуваних фібробетонних сумішей, інтенсивна гідратація та тверднення обумовлюють відповідні особливості порової структури бетонів.

При вивченні якісних особливостей порової структури бетонів розповсюджений метод, оснований на аналізі кінетики водонасичення. При цьому, відповідно до ДСТУ Б В.2.7-170 [6] встановлювали значення коефіцієнта середнього розміру пор (λ) та показник однорідності пор за розмірами (α). Чим нижче водопоглинання та значення коефіцієнта середнього розміру пор і чим вищий показник однорідності, тим рівномірніше розподілені пори за розмірами, що забезпечує отримання щільної та однорідної структури матеріалу.

Результати дослідів та розрахунків приведені в табл. 4. Аналіз приведених даних показує, що зменшення водовмісту та водоцементного відношення бетонних сумішей призвело до суттєвого зменшення водопоглинання як характеристики відкритої капілярної пористості. Спостерігається також чітка кореляція вказаних вище характеристик та параметрів порової структури λ та α . Зменшення показника середнього розміру пор супроводжується зростанням впорядкованості структури, про що свідчить збільшення показника однорідності α .

Фібробетон з композиційним дисперсним армуванням характеризується меншими показниками як середнього розміру пор λ , так і вищими показниками однорідності α (табл. 4). Базальтову фібру в даному випадку можна розглядати в якості своєрідної підложки [7] – поверхні, на якій випереджаючим темпом формується щільний та міцний шар цементного ка-

Таблиця 2.

Вплив тривалості віброущільнення та рухомості бетонної суміші на коефіцієнт розшарування дрібнозернистого сталефібробетону

Вміст сталевої фібри, кг/м³	Рухомість суміші (ОК), см	Коефіцієнт розшарування при тривалості віброущільнення, с			
		15	30	45	60
80	5-9	0,96	0,91	0,85	0,76
	10-15	0,88	0,82	0,71	0,61
	16-21	0,83	0,74	0,62	0,47
120	5-9	0,87	0,84	0,78	0,69
	10-15	0,77	0,74	0,67	0,48
	16-21	0,73	0,65	0,52	0,35

Таблиця 3.

Вплив тривалості віброущільнення та рухомості бетонної суміші на коефіцієнт дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням

Вміст сталевої/базальтової фібри, кг/м³	Рухомість суміші (ОК), см	Коефіцієнт розшарування при тривалості віброущільнення, с			
		15	30	45	60
80 / 2	5-9	0,96	0,93	0,89	0,79
	10-15	0,91	0,86	0,81	0,72
	16-21	0,88	0,81	0,74	0,54
120 / 2	5-9	0,93	0,9	0,81	0,71
	10-15	0,86	0,83	0,77	0,58
	16-21	0,83	0,74	0,62	0,47

Параметри порової структури фібробетонів

№ складів	Водо-цементне відношення	Водовміст, кг/м ³	Загальна пористість, % (P ₀)	Відкрита капілярна пористість, % (W ₀)	Показник середнього розміру пор	Показник однорідності пор α	Фібра, кг/м ³	Вид та вміст пластифікатора, %
Дрібнозернистий сталеві фібробетон								
1	0,46	230	11,6	7,5	0,59	0,52	–	–
2	0,48	238	11,8	7,4	0,54	0,61	100	–
3	0,36	178	9,7	5,1	0,39	0,69	100	C-3 (1%)
4	0,31	155	9,9	4,9	0,33	0,71	100	Melflux (0,5%)
Фібробетон з композиційним дисперсним армуванням								
5	0,50	248	12,1	8,1	0,45	0,65	100+2	–
6	0,38	188	9,3	5,5	0,31	0,72	100+2	C-3 (1%)
7	0,32	161	9,5	5,3	0,25	0,76	100+2	Melflux (0,5%)

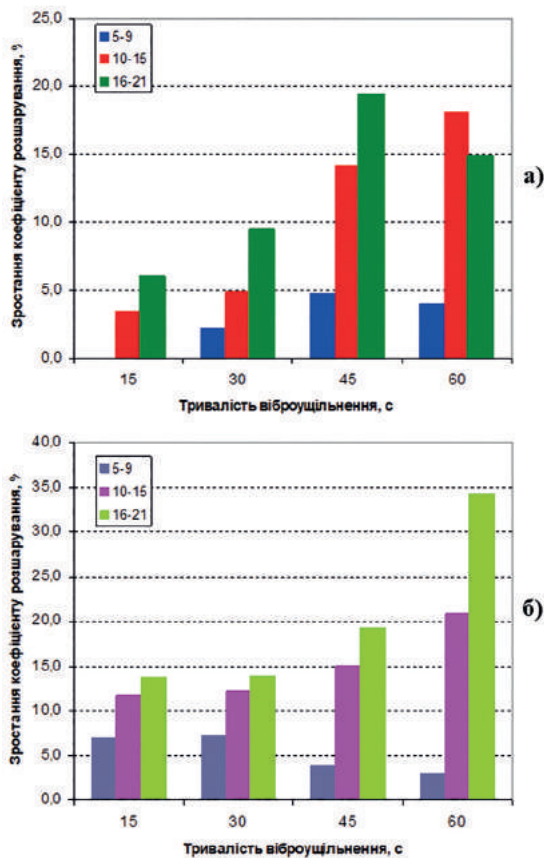


Рис. 1. Збільшення коефіцієнту розшарування при використанні композиційного дисперсного армування при витраті сталеві фібри 80 кг/м³ (а) і 120 кг/м³ (б)

меню (контактна зона), що проявляє при достатньому насиченні суміші такими волокнами суттєвий вплив на міцнісні та деформативні властивості фібробетону.

Дисперсне армування сприяє формуванню більш дрібних, переважно замкнених пор у порівнянні з неармованим бетоном. При цьому ступінь впливу дисперсного армування зростає зі зменшенням геометричних розмірів фібр і збільшенням їх кількісного вмісту в суміші. Однак при досягненні деякого порогового значення концентрації фібр однорідність їх розподілу в суміші погіршується, утворюються грудки з волокон, не покриті цементним тістом, що негативно впливає на порову структуру матеріалу.

З наведених даних очевидно, що найкращі характеристики пористості проявляють фібробетони з композиційним дисперсним армуванням в присутності суперпластифікаторів. Все це однозначно свідчить про покращення структурних характеристик фібробетону в результаті використання комбінації сталевих та базальтових волокон.

Висновки

1. Експериментально встановлено можливість одержання полідисперсно армованого фібробетону з використанням сталеві та базальтові фібри. При використанні базальтові фібри з довжиною волокон 12 мм в кількості 2...4 кг/м³ зафіксоване середнє зростання міцності на розтяг при згині 10...20% у порівнянні із складами фібробетонів, що не містили неметалічну фібру.

2. Для фібробетону з композиційним дисперсним армуванням при однаковій тривалості віброуцільнення розшарування є меншим, ніж для сталеві фібробетону. Експериментально підтверджено гіпотезу про можливість уникнення або суттєвого зменшення розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування.

3. Показники, що характеризують середній розмір пор та однорідність порового простору фібробетонів значно покращуються при введенні добавок суперпластифікаторів, особливо полікарбоксилатного типу. Найкращі характеристики пористості проявляють фібробетони з композиційним дисперсним армуванням.

Література:

- К вопросу применения нескольких видов фибр для дисперсно армированных бетонов / [Клюев С. В., Лесовик Р. В., Клюев А. В., Бондаренко Д. О.]. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – № 94. – 2012. – С. 81–83.
- Пухаренко Ю. В. Полидисперсное армирование строительных композитов – фибробетон / Ю. В. Пухаренко, И. У. Аубакирова // Технологии бетонов. 2011, №1–2. – С. 28–29.
- Голанцев В. А. Свойства и особенности полиармированных фибробетон: дис. ... канд. техн. наук / В. А. Голанцев. – Л., 1990. – 214 с.
- Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсноармованих цементуючих систем / [Саницький М. А., Марущак У. Д., Кіракевич І. І., Стечишин М. С.]. Будівельні матеріали і виробы, 2015. – № 1. – С. 6–9.
- СТО НОСТРОЙ 2.27.125–2013. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ. – Москва. – 2012. – 117 с.
- ДСТУ Б В.2.7-170-2008. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. – К: Мінрегіонбуд України, 2008. – 38 с.
- Пухаренко Ю. В. Высокопрочный сталефибробетон / Ю. В. Пухаренко, В. Ю. Голубев // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – №9. – С. 40–41.