



УДК 691(075.3)



**ДВОРКІН Л.І.**

Д-р технічних наук, проф.,  
зав. каф., Національний  
університет водного господарства  
та природокористування,  
м. Рівне, Україна,  
e-mail: dvorkin.leonid@gmail.com,  
тел.: +38 (068) 353-33-38,  
ORCID: 0000-0001-8759-6318



**БОРДЮЖЕНКО О.М.**

Канд. технічних наук, доц.,  
Національний університет  
водного господарства та  
природокористування,  
м. Рівне, Україна,  
e-mail: bord@nuwm.edu.ua,  
тел.: +38 (067) 528-73-31,  
ORCID: 0000-0003-3686-5121

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ ФІБРОБЕТОНІВ ІЗ СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРАМИ РІЗНИХ ТИПІВ

### АНОТАЦІЯ

Експериментально встановлено, що для сталевібробетонів, як і для звичайних бетонів, діє правило «сталості водопотреби», відповідно до якого при постійній рухомості бетонної суміші водопотреба залишається практично постійною при цементно-водних відношеннях, менших деякого критичного значення ( $C/V < C/V_{кр}$ ). Зона критичного  $C/V$  для досліджуваних фібробетонів знаходиться в межах 2,2...2,3, а при введенні суперпластифікаторів зміщується до значень  $C/V = 2,6...2,7$ . Цей ефект можна пояснити суттєвим зменшенням нормальної густоти і, відповідно, водопотреби цементного тіста. Отримано експериментально-розрахункові залежності водопотреби фібробетонних сумішей, в т.ч. при використанні водоредукуючих добавок в широкому діапазоні рухомості бетонних сумішей. Для отриманих залежностей запропоновані відповідні поправки при  $C/V > C/V_{кр}$ .

Вивчено зміну рухомості фібробетонних сумішей у випадках застосування звичайного важкого і дрібнозернистого бетонів. Досліджено діапазони зміни рухомості з урахуванням факторів, що характеризують їх склад, а також при введенні суперпластифікуючих добавок. Показано, що при оптимізації складу фібробетонних сумішей їх рухомість може залишатися практично стабільною протягом 1 години. Для забезпечення збережуваності фібробетонних сумішей і збільшення її тривалості, особливо при введенні суперпластифікаторів, ефективно застосовувати перемішування при її транспортуванні.

Вивчено вплив рухомості бетонної суміші і тривалості її віброущільнення на коефіцієнт розшарування (однорідності). Показано, що для дрібнозернистого сталевібробетону при однаковій тривалості віброущільнення розшарування є меншим, ніж для звичайного важкого фібробетону. Збільшення вмісту цементу при однаковому  $V/C$  і вмісту фібри дозволяє підвищити коефіцієнт

однорідності в досліджуваному діапазоні тривалостей вібрації на 15...20%.

Застосування дрібнозернистого сталевібробетону навіть при збільшеному вмісті фібри дозволяє істотно збільшити коефіцієнт однорідності.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** сталевібробетон, фібра, суперпластифікатор, бетонна суміш, рухомість, розшарування.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ФИБРОБЕТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУПЕРПЛАСТИ- ФИКАТОРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

**ДВОРКИН Л.И.** Д-р технических наук, проф.,  
зав. каф., Национальный университет водного  
хозяйства и природопользования,  
г. Ровно, Украина,  
e-mail: dvorkin.leonid@gmail.com,  
тел.: +38 (068) 353-33-38,  
ORCID: 0000-0001-8759-6318

**БОРДЮЖЕНКО О.М.** Канд. технических наук,  
доц., Национальный университет водного хозяй-  
ства и природопользования,  
г. Ровно, Украина,  
e-mail: bord@nuwm.edu.ua,  
тел.: +38 (067) 528-73-31,  
ORCID: 0000-0003-3686-5121

### АННОТАЦИЯ

Экспериментально установлено, что для сталевібробетонных, как и для обычных бетонов, действует правило «постоянства водопотребности», в соответствии с которым при постоянной подвижности бетонной смеси водопотребность остается практически постоянной при цементно-водных отношениях меньших некоторого критического значения ( $C/V < C/V_{кр}$ ). Зона критического  $C/V$  для исследуемых фибробетонных находится в пределах 2,2...2,3



а при введении суперпластификаторов смещается к значениям  $C/W = 2,6...2,7$ . Этот эффект можно объяснить существенным уменьшением нормальной плотности и, соответственно, водопотребности цементного теста. Получены экспериментально-расчетные зависимости водопотребности фибробетонных смесей, в т.ч. при использовании водоредуцирующих добавок в широком диапазоне подвижностей бетонных смесей. Для полученных зависимостей предложены соответствующие поправки при  $C/W > C/W_{кр}$ .

Изучено изменение подвижности фибробетонных смесей в случаях применения обычного тяжелого и мелкозернистого бетонов. Исследованы диапазоны изменения подвижности с учетом факторов, характеризующих их состав, а также при введении суперпластифицирующих добавок. Показано, что при оптимизации состава фибробетонных смесей их подвижность может оставаться практически стабильной на протяжении до 1 часа. Для обеспечения сохранности фибробетонных смесей и увеличения ее продолжительности, особенно при введении суперпластификаторов, эффективно применять перемешивание при ее транспортировке.

Изучено влияние подвижности бетонной смеси и продолжительности ее виброуплотнения на коэффициент расслоения (однородности). Показано, что для мелкозернистого сталефибробетона при одинаковой продолжительности виброуплотнения расслоение меньше, чем для обычного тяжелого фибробетона. Увеличение содержания цемента при одинаковом  $W/C$  и содержании фибры позволяет повысить коэффициент однородности в исследуемом диапазоне длительностей вибрации на 15...20%.

Применение мелкозернистого сталефибробетона даже при увеличенном содержании фибры позволяет существенно увеличить коэффициент однородности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сталефибробетон, фибра, суперпластификатор, бетонная смесь, подвижность, расслоение.

## TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH FIBER CONCRETES WITH SUPERPLASTICIZERS OF DIFFERENT TYPES

**DVORKIN L.Yo.** Dr, Prof., Head of Department, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine,  
e-mail: dvorkin.leonid@gmail.com,  
tel.: +38 (068) 353-33-38,  
ORCID: 0000-0001-8759-6318

**BORDIUZHENKO O.M.** PhD., Ass. Prof., National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine,  
e-mail: bord@nuwm.edu.ua,  
tel.: +38 (067) 528-73-31,  
ORCID: 0000-0003-3686-5121

## ABSTRACT

It has been experimentally established that for steel-fiber concretes, as well as for ordinary concretes, the rule of "water content constant" operates, according to which, at constant workability of a concrete mix, the water demand remains practically constant in area of cement-water ratios less than a certain critical value ( $C/W < (C/W)_{cr}$ ). The critical  $C/W$  zone for the investigated fiber concretes is within the range of 2.2 ... 2.3 and when superplasticizer is introduced, it changes to the values  $C/W = 2.6...2.7$ . This effect can be explained by a significant decrease in normal consistency and, accordingly, water demand for cement paste. Experimental-calculation dependences of water consumption of fiber-concrete mixes, including using water-reducing additives, are fair in a wide range of workability of concrete mixtures. Appropriate corrections are proposed for the obtained dependences at  $C/W > (C/W)_{cr}$ .

The kinetic of the fiber concrete mixes fluidity change in cases of application of conventional and fine-grained concrete was studied. The ranges of change in fluidity were studied taking into account the factors characterizing their composition as well as the introduction of superplasticizing additives. It was shown that when optimizing the composition of fibre concrete mixtures, their fluidity may remain practically stable for up to 1 hour. To ensure the conservation of the fibre concrete mixture and increase its duration, especially when introducing superplasticizers, it is efficient to apply additional mixing during transportation. The influence of the workability of the concrete mixture and the duration of its vibration sealing on the coefficient of stratification (homogeneity) is studied. It is shown that for a fine-grained steel-fiber concrete with the same duration of vibration compaction, the stratification is less of the conventional fibrous concrete. Cement content increasing with the same  $W/C$  and fiber content allows to increase the homogeneity coefficient in the investigated range of vibration durations by 15...20%.

The use of fine-grained steel-fiber reinforced concrete even with increased fiber content makes it possible to substantially increase the coefficient of its uniformity.

**KEY WORDS:** steel-fiber concrete, fiber, superplasticizer, concrete mix, workability, stratification.

## ВСТУП

Однією із сучасних тенденцій в будівництві є використання фібробетонів, в т.ч. високоміцних сталефібробетонів. Різноманіття областей застосування виробів та конструкцій, що виготовляються зі сталефібробетону, зумовлено тим, що порівняно із звичайним бетоном він характеризується у декілька разів більшою міцністю на осьовий розтяг та розтяг при згині, вищою тріщиностійкістю, стійкістю до ударних і вібраційних впливів тощо.



У той же час, широке використання сталефібробетонів потребує дослідження низки питань, пов'язаних із властивостями фібробетонних сумішей, що безпосередньо визначають особливості технології їх приготування та вкладання.

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Численні експериментальні та теоретичні роботи, що стосуються фібробетонів, спрямовані переважно на визначення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, в той час, як технологічні властивості фібробетонних сумішей розглядаються побіжно. Найчастіше відзначається вплив фактору легкоукладальності фібробетонної суміші [1-4] та її зв'язок із пористістю [5]. Аналіз цих та інших робіт вказує на недостатність досліджень технологічних властивостей фібробетонних сумішей, зокрема таких, як водопотреба, розшаровуваність, збережуваність рухомості у часі тощо. Недостатньо розглянуто питання впливу на ці властивості пластифікуючих добавок, особливо суперпластифікаторів нового покоління.

### МЕТА РОБОТИ

Метою роботи було дослідження технологічних властивостей крупно- та дрібнозернистих сталефібробетонних сумішей та вплив на ці властивості факторів складу та умов приготування.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

**Водопотреба і легкоукладальність.** Водопотреба і легкоукладальність – найважливіші взаємопов'язані між собою технологічні властивості бетонних сумішей, що визначають як здатність їх до ущільнення, так і, значною мірою, властивості затверділого бетону.

У технології бетону відоме правило сталості водопотреби. Воно обумовлює, що при незмінному вмісті витрата цементу в межах 200...400 кг/м<sup>3</sup> не впливає істотно на легкоукладальність бетонних сумішей. Відповідно до цього правила водопотреба бетонних сумішей, необхідна для досягнення заданого показника легкоукладальності, є практично постійною у визначеному діапазоні витрат цементу і відношенні Ц/В.

Встановлення верхньої межі області правила постійності водопотреби, що дозволяє враховувати особливості цементу, що застосовується, досягається при визначенні його через критичне Ц/В ((Ц/В)<sub>кр</sub>), що рівне в середньому 1,68Кн.г, де Кн.г – Ц/В, що відповідає нормальній густоті цементного тіста [6]. Для бетонів звичайних класів (Ц/В)<sub>кр</sub> знаходиться в межах 2,2...2,4.

Із фізичних позицій правило сталості водопотреби полягає в тому, що зі збільшенням Ц/В до деякого критичного значення ріст структурної в'язкості цементного тіста в бетонній суміші компенсується збільшенням його кількості і відповідно товщини шару цементного тіста на зернах заповнювача.

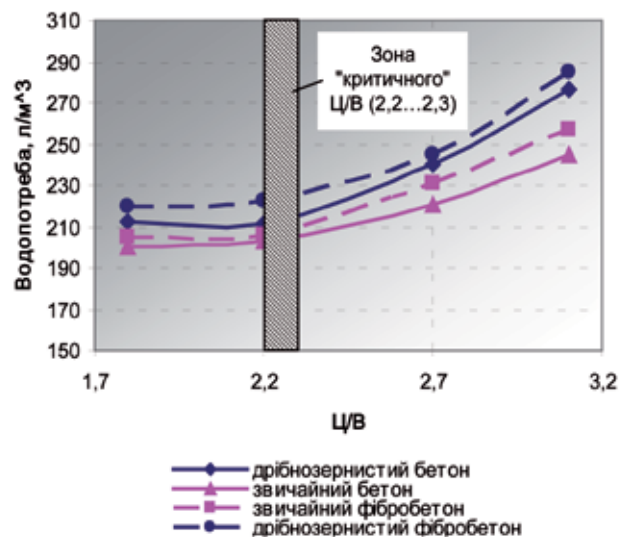
За межами критичного Ц/В збільшення кількості цементного "мастила" вже не компенсує прогресивно зростаючу водопотребу бетонної суміші.

Для встановлення впливу Ц/В на водопотребу високоміцних фібробетонів досліді проводили на двох видах бетонів: на звичайному важкому із застосуванням як крупного заповнювача щебеню (5 – 20) мм та дрібнозернистому із застосуванням в якості заповнювача фракційної суміші з кварцового піску (0,16 – 2) мм та гранітного щебеню (2 – 5) мм.

Як вихідні компоненти бетонної суміші використовували цемент ПЦ-І М500 ПАТ «Волинь-цемент», кварцовий пісок із  $M_{кр} = 2,1$ , гранітний щебінь фракції (5 – 20) мм. Витрату фібри змінювали від 40 кг/м<sup>3</sup> ( $\mu = 0,5\%$ ) – для звичайного бетону і до 100 кг/м<sup>3</sup> ( $\mu = 1,3\%$ ) – для дрібнозернистого. В бетонні суміші вводили суперпластифікатори С-3 (Поліпласт СП-1) та полікарбоксилат Melflux 2651f. Співвідношення піску і щебеню для звичайного важкого бетону розраховували згідно з відомими рекомендаціями [7].

Використовували хвилясту фібру із низьковуглецевої сталі типу Fibax ФІ 60/1 (довжина 60,0 ± 6,0 мм, діаметр 1,0 ± 0,1 мм).

На першому етапі бетонні суміші готували при чотирьох різних значеннях Ц/В. Рухомість сумішей витримували в межах 15 см. Результати дослідів наведені на рис. 1.



**Рис. 1.** Вплив Ц/В на водопотребу фібробетонних сумішей при витраті фібри для дрібнозернистого фібробетону – 1,3%, для звичайного фібробетону – 0,8%

Як свідчать представлені на рис. 1 результати, правило сталості водопотреби виконується і у випадку використання фібробетонних сумішей. Верхня межа області "критичного" Ц/В для таких сумішей знаходиться в межах 2,2 – 2,3 (рис. 1). Також, розглядаючи аналогічні склади сумішей без фібри, можна відзначити, що введення фібри призводить до зростання водопотреби на (3 – 12)%



залежно від виду заповнювача. Дрібнозернисті суміші характеризуються більшою водопотребою порівняно із сумішами на крупному заповнювачі, що пояснюється більшою сумарною поверхнею зерен у першому випадку.

Потрібно також відзначити, що звичайні фібробетонні суміші при високих значеннях Ц/В характеризувалися схильністю до розшарування, тоді, як для дрібнозернистих сумішей це явище було виражене в значно меншій мірі.

Розглядаючи вплив вмісту фібри на водопотребу бетонних сумішей (рис. 2), можна відмітити закономірність росту водопотреби при зростанні її об'ємної витрати.

Використання пластифікуючих добавок Melflux 2651F та С-3 поряд із зниженням водопотреби змущує "критичне" Ц/В до значень 2,6 – 2,7 (рис. 3).

У межах правила постійності водопотреби для досліджуваних бетонів встановлено залежності водовмісту від рухомості бетонної суміші (рис. 4). Витрата суперпластифікатора Melflux 2651F становила 0,5%, С-3 – 1%. Витрати фібри відповідали раніше встановленим оптимальним значенням.

Як видно з наведених даних, застосування добавок пластифікаторів призводить до того, що суміші (особливо дрібнозернисті) стають більш чутливими до зміни рухомості вже при невеликих змінах водовмісту.

Для визначення зміни водопотреби бетонних сумішей за межами правила сталості водопотреби збільшення водопотреби  $\Delta B$  можна знаходити за емпіричною формулою [6]:

$$\Delta B = \left( B / \Pi - \frac{1}{1,68 K_{н.з.}} \right) \left( \frac{B_0}{100} \right)^{5,5}, \quad (1)$$

де  $B_0$  – водопотреба, встановлена в межах дії правила постійності водопотреби;  $K_{н.з.}$  – нормальна густина цементу.

У табл. 1 представлено значення водовмісту бетонних сумішей при  $\Pi/\text{В} > (\Pi/\text{В})_{кр}$  і різних показниках рухомості бетонної суміші, а також значення  $\Delta B$ , обчислені за формулою (1) і знайдені експериментально. Водовміст фібробетонних сумішей знаходили за умови використання базових складів звичайного та дрібнозернистого бетонів, що встановлені раніше.

Отримані результати показують хорошу збіжність за величиною поправок, як розрахованих за формулою (1), так і знайдених експериментально. Значення поправок, що наведені в табл. 1, можна використовувати при проектуванні складів високоміцних фібробетонів, що потребують високих значень Ц/В.

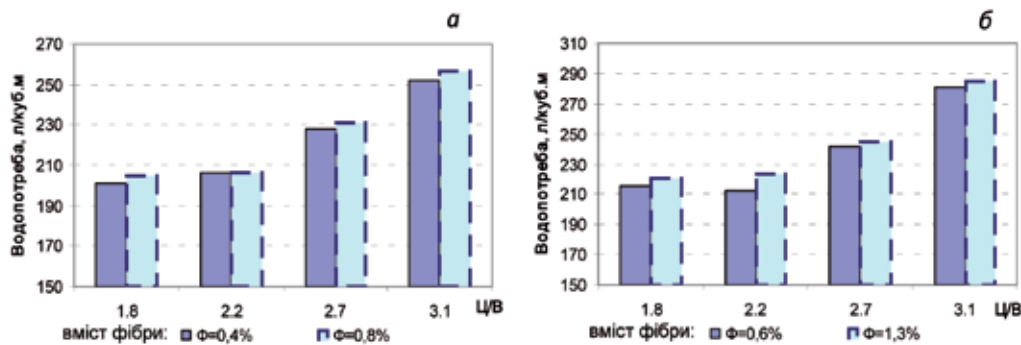


Рис. 2. Вплив вмісту фібри та Ц/В на водопотребу фібробетонних сумішей звичайного (а) та дрібнозернистого (б) фібробетонів

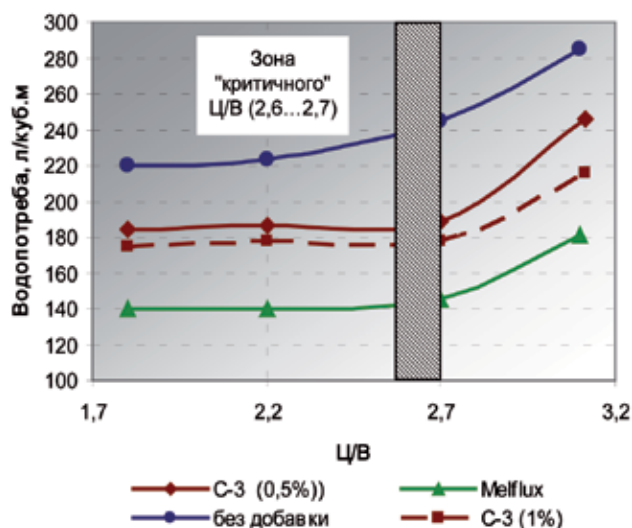


Рис. 3. Вплив Ц/В на водопотребу дрібнозернистих фібробетонних сумішей при використанні водоредукуючих добавок

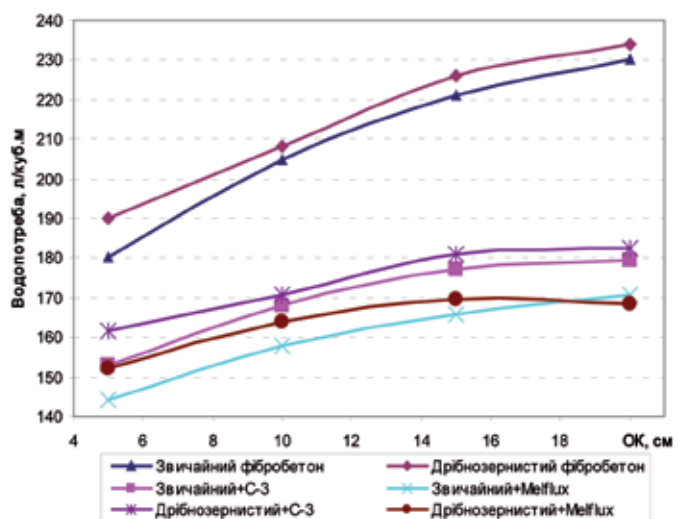


Рис. 4. Розрахункові залежності впливу на водопотребу фібробетонних сумішей показників рухомості при використанні водоредукуючих добавок





Таблиця 1. Розрахункові та експериментальні значення поправки до водопотреби фібробетонних сумішей

ОК, см	В <sub>0</sub> , л при (Ц/В) <sub>кр</sub> ≤ 2.2	Поправка до водопотреби ΔВ, л (за формулою 1) при		Поправка до водопотреби ΔВ, л (експериментальна) при	
		Ц/В = 2,7	Ц/В = 3,1	Ц/В = 2,7	Ц/В = 3,1
Звичайний фібробетон					
5	185	14,6	26,4	15	27
10	205	25,7	46,4	24	42
15	218	36,0	65,1	32	61
20	225	42,9	77,5	43	75
Дрібнозернистий фібробетон					
5	192	17,9	32,4	16	31
10	210	29,3	53,0	26	50
15	225	42,9	77,5	43	76
20	238	58,4	105,5	56	103

**Збережуваність рухомості фібробетонних сумішей у часі.** Важливим питанням при дослідженні технологічних властивостей фібробетонних сумішей є прогнозування втрати рухомості – або життєздатності, або збережуваності рухомості суміші в часі, що дозволяє вносити корективи при призначенні початкової легкоукладальності та визначати допустиму тривалість транспортування суміші.

Для високорухомих бетонних та фібробетонних сумішей за показник збережуваності рухомості можна прийняти час, за який середнє значення осадки конуса зменшиться від 20 до 15 см. Для порівняльної оцінки збережуваності рухомості сумішей в часі були проведені випробування бетонних та фібробетонних сумішей, склади яких представлені в табл. 2.

суміші у часі у порівнянні із сумішшю без фібри. В цілому втрати рухомості протягом першої години для всіх складів є незначними. Збережуваність рухомості сумішей складів 1 - 4 становить відповідно 1,5 год., 1,35 год., 0,95 год. та 0,76 год.

Розглядаючи зміну рухомості у часі для дрібнозернистого бетону (рис. 6), можна відзначити наступні особливості. В цілому характер залежностей подібний до звичайного бетону, в той же час в абсолютних значеннях втрата рухомості є більш суттєвою. Очевидно, це можна пояснити більшою зв'язаністю розчинової частини при наявності великої питомої поверхні дрібного заповнювача.

Найбільші втрати рухомості в часі мають суміші знову ж таки з добавками суперпластифікаторів, причому, кінетика зміни рухомості для складів

На рис. 5 представлено збережуваність показників рухомості бетонних сумішей на крупному заповнювачі складів за табл. 2. Найбільші втрати рухомості в часі мають суміші з добавками суперпластифікаторів, найменші – без пластифікатора та використання фібри. Відомо, що рухомі пластифіковані суміші втрачають рухомість швидше, ніж рівнорухомі суміші без добавки суперпластифікатора, що закономірно пояснюється більшим вмістом водовмістом останніх.

Введення фібри приводить до деякого зменшення збережуваності рухомості

сумішей з використанням обох суперпластифікаторів є практично однаковою до 1,5 год., найменші – без пластифікатора та використання фібри.

Втрати рухомості протягом першої години для всіх складів є більш суттєвими порівняно із сумішами на крупному заповнювачі. Збережуваність рухомості сумішей складів 5 – 8 становить відповідно 1,34 год., 0,77 год., 0,51 год. та 0,49 год.

У процесі визначення збережуваності помічено характерну особливість сумішей, що включають до свого

Таблиця 2. Склади сумішей та міцнісні показники фібробетонів

№	В/Ц	Витрата основних компонентів, кг/м³				Фібра, кг/м³	Вид та вміст пластифікатора, %	Міцність у віці 28 діб, МПа	
		вода	цемент	пісок	щебінь			розтяг при згині	стиск
Звичайний фібробетон									
1	0.46	230	500	655	1252	–	–	3,5	53,2
2	0.48	238	500	655	1252	60	–	7,9	55,6
3	0.36	178	500	655	1252	60	C-3 (1%)	10,8	83,5
4	0.27	135	500	655	1252	60	Melflux (0,5%)	12,1	102,1
Дрібнозернистий фібробетон									
5	0.53	263	500	837	1023	–	–	4,6	45,9
6	0.50	248	500	837	1023	100	-	11,6	48,5
7	0.38	188	500	837	1023	100	C-3 (1%)	14,3	69,5
8	0.32	161	500	837	1023	100	Melflux (0,5%)	16,2	85,3



складу пластифікатори. Збережуваність (життєздатність) таких сумішей можна суттєво збільшити, використовуючи додаткове постійне чи періодичне перемішування після їх приготування. На рис. 7 представлено порівняння зміни рухомості у часі фібродрібнозернистих бетонних сумішей (склади 7 – 8, табл. 2), перемішаних одноразово та таких же сумішей, що піддавалися додатковому перемішуванню (2 – 2,5) хв. кожні 0,5 год.

Аналіз рис. 7 показує, що за умов додаткового перемішування життєздатність фібробетонних сумішей з використанням пластифікуючих добавок можливо суттєво подовжити. Особливо це стосується суміші з використанням добавки Mellflux, для якої збережуваність (при зниженні рухомості на 5 см) складала 1,54 год., що в 3 рази перевищує значення для суміші, перемішаної однократно.

Для підвищення життєздатності фібробетонних сумішей доцільним є введення суперпластифікаторів після попереднього (2-хвилинного) перемішування бетонної суміші. Такий спосіб дозволяє одержати економію добавки порівняно зі складом при введенні її з водою замішування для одержання сумішей і бетонів з однаковими характеристиками.

Тривалість дії пластифікуючої добавки підвищується також при її порційному введенні в бетонну суміш. Ефективність порційного введення для одержання високорухомих сумішей можливо пояснити з позиції необхідності підтримки в рідкій фазі цементу, що гідратується, деякої надлишкової кількості пластифікатора. Однак багаторазове введення добавки для відновлення рухомості може призвести до погіршення порової структури і, як наслідок, зниження технологічних властивостей бетону.

**Розшаровуваність фібробетонних сумішей.** Технологічні заходи, пов'язані з укладанням, ущільненням і обробленням армованих волокнами бетонних матеріалів, практично не відрізняються від традиційних. При виготовленні дисперсноармованих бетонів підвищену увагу необхідно приділяти тривалості вібрування. Час віброобробки спричиняє істотний вплив на рівномірність розподілу фібри по об'єму бетону. Перевищення часу вібрації бетонної суміші понад встановлений (залежно від його складу) може призвести до розшарування армованої суміші. В даному випадку, внаслідок різниці в значеннях середньої густини бетону і сталі, під дією сил гравітації фібра в процесі вібрації суміші прагне опуститися вниз (до піддону).

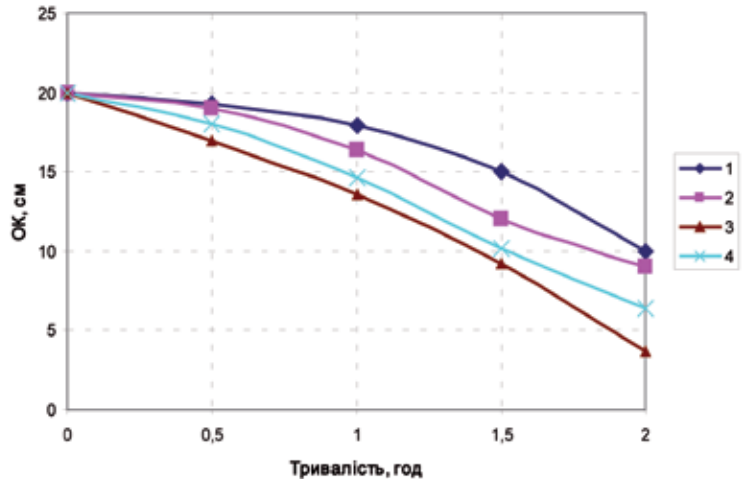


Рис. 5. Зміна рухомості бетонних сумішей за осадкою конуса (номера складів відповідають табл. 2)

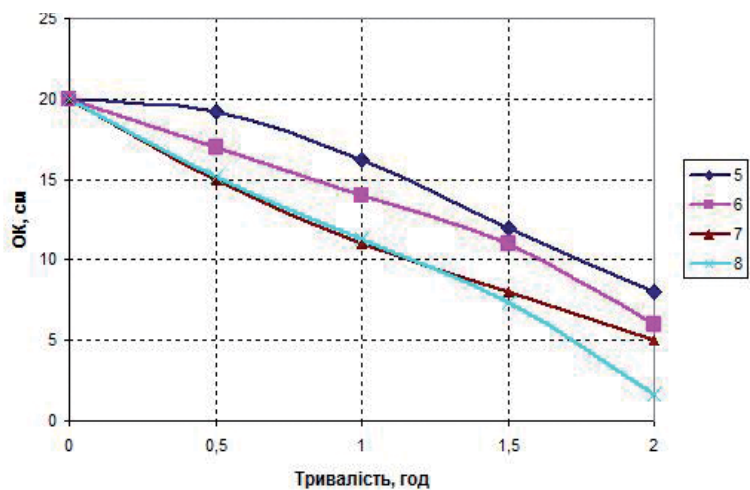


Рис. 6. Зміна рухомості дрібнозернистих бетонних сумішей за осадкою конуса (номера складів відповідають табл. 2)

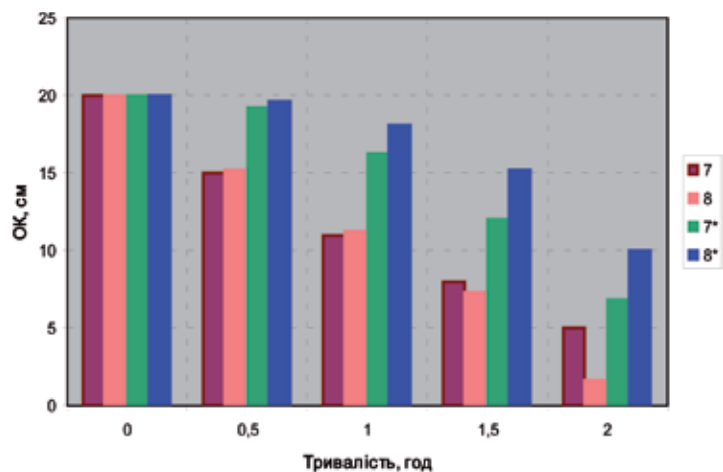


Рис. 7. Зміна рухомості дрібнозернистих бетонних сумішей при однократному та багаторазовому перемішуванні (номера складів відповідають табл. 2, \* - при застосуванні додаткового перемішування)



Іноді ця властивість використовується для забезпечення зонного армування, коли за розрахунком у будь-якій частині (зоні) виробу потрібно більш високий рівень армування. Регулювання часу вібрації для забезпечення рівномірного або зонного армування здійснюється на стадії виготовлення виробів [2].

Для уникнення процесів розшарування сталевібробетонної суміші було виконано експериментальні дослідження, пов'язані зі встановленням впливу вмісту сталевих фібри та тривалості віброущільнення на розшарування бетонної суміші різної рухомості. Всі дослідження виконували на дрібнозернистому бетоні однакового складу. Необхідну рухомість бетонної суміші забезпечували підбором вмісту суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f. Вміст сталевих фібри складав 60 та 100 кг/м<sup>3</sup> бетонної суміші.

Рівномірність розподілення фібри по об'єму бетонної суміші оцінювалася за коефіцієнтом розшарування, що визначали за методикою [8]. Ця методика полягає в наступному: в циліндричну форму висотою 200 мм та діаметром 100 мм вкладають фібробетонну суміш та піддають її віброущільненню. Після цього отриманий циліндр розрізають на дві рівні частини – верхню та нижню. З кожної із частин, за допомогою промивання, відділяють фібру та зважують її, а коефіцієнт розшарування визначають за формулою:

$$K_p = m_{\text{верх.}f} / m_{\text{нижн.}f}, \quad (2)$$

де  $m_{\text{верх.}f}$  та  $m_{\text{нижн.}f}$  – маса фібри відповідно в верхній та нижній частинах циліндру.

Результати експериментальних досліджень коефіцієнта розшарування дрібнозернистого сталевібробетону представлено на рис. 8.

Отримані експериментальні результати

свідчать про те, що найбільш суттєвими факторами, що впливають на коефіцієнт розшарування сталевібробетонної суміші, є її рухомість, а також тривалість віброущільнення. Встановлено, що при збільшенні рухомості бетонної суміші необхідно суттєво обмежувати тривалість віброущільнення. Для забезпечення необхідного коефіцієнта розшарування, що відповідно до [9] 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 фібри у досліджуваному діапазоні суттєво не впливає на коефіцієнт розшарування дрібнозернистого сталевібробетону. При сталій рухомості бетонної суміші та тривалості віброущільнення, збільшення вмісту сталевих фібри в діапазоні від 60 до 100 кг/м<sup>3</sup> бетонної суміші призводить до зменшення коефіцієнта розшарування в середньому на (3 – 5) %.

Таким чином, виконані експериментальні дослідження дозволили встановити оптимальні тривалості віброущільнення дрібнозернистого сталевібробетону, що будуть забезпечувати рівномірне розподілення сталевих фібри по об'єму бетону, що призводить до покращення фізико-механічних властивостей бетонних виробів, виготовлених на його основі.

## ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлено, що для сталевібробетонів, як і для звичайних бетонів, діє правило "постійності водопотреби", відповідно до якого при постійній рухомості

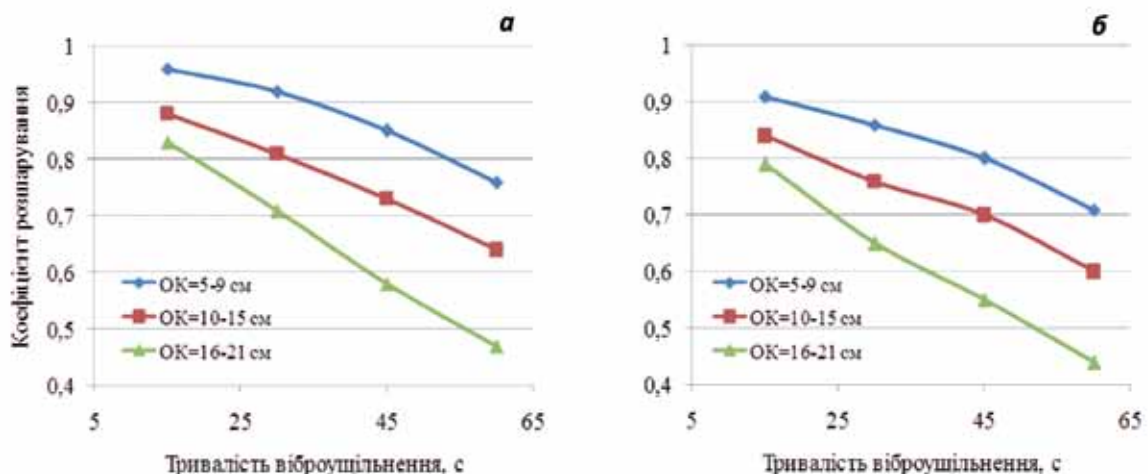


Рис. 8. Залежність коефіцієнта розшарування від тривалості віброущільнення дрібнозернистого фібробетону при різних рухомості бетонної суміші при вмісті фібри 60 кг/м<sup>3</sup> (а) та 100 кг/м<sup>3</sup> (б)



бетонної суміші водопотреба залишається практично постійною при цементно-водних відношеннях менших деякого критичного значення ( $C/V < C/V_{кр}$ ). Верхня межа області "критичного  $C/V$ " для фібробетонних сумішей знаходиться в межах 2,2 – 2,3. Отримано експериментально-розрахункові залежності водопотреби фібробетонних сумішей, в т.ч. при використанні водоредукуючих добавок, в широкому діапазоні рухомості бетонних сумішей.

2. Вивчено зміну рухомості фібробетонних сумішей для звичайного важкого і дрібнозернистого бетонів. Досліджено діапазони зміни рухомості з врахуванням факторів, що характеризують їх склад, а також при введенні суперпластифікуючих добавок.
3. Вивчено вплив рухомості бетонної суміші та тривалості її віброущільнення на коефіцієнт розшарування (однорідності). Показано, що для дрібнозернистого сталевібробетону при однаковій тривалості віброущільнення розшарування є меншим на (10 – 15)%, ніж для звичайного важкого фібробетону. Застосування дрібнозернистого сталевібробетону навіть при збільшеному вмісті фібри дозволяє суттєво збільшити коефіцієнт однорідності.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Волков И.В. Сталевібробетонные конструкции зданий и сооружений / И.В. Волков, В.А. Беляева // Обзорная информация. - М.: ВНИИТП. - 1990. - 59 с.
2. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции. Монография. - М. : АСВ, - 2006. - 560 с.
3. Пухаренко Ю.В. Высокопрочный сталефибробетон / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев // Промышленное и гражданское строительство. - 2007. - №9. - С. 40 - 41.
4. Дорф В.А. Влияние содержания и характеристик фибры на коэффициент истираемости сталевібробетона с цементно-песчаной матрицей / В.А. Дорф, Р.О. Красновский // Технологии бетонов. - 2013. - №12. - С. 40 - 42.
5. DBV-Merkblatt. Stalfaserbeton. - DeutscherBeton - und Bautechnik-Verein. - 2001.
6. Дворкін Л.Й. Проектування складів бетону / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін. - Рівне: НУВГП, 2015. - 353 с.
7. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. - Київ: Основа, 2007. - 616 с.
8. СТО НОСТРОЙ 2.27.125 - 2013. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. - М. : ЦИТП, 2015. - 103 с.

Стаття надійшла до редакції 14.08.2017 р.