УДК 666.973 DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.2.24

ВПЛИВ ДИСПЕРСНОГО АРМУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ДОРОЖНІХ БЕТОНІВ, ОТРИМАНИХ ШЛЯХОМ ВІБРОПРЕСУВАННЯ НАДЖОРСТКИХ СУМІШЕЙ

Житковський В.В., Дворкін Л.Й.
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

Анотація. *Наведено результати дослідження впливу сталевої та базальтової фібри на властивості наджорстких бетонних сумішей, їх здатність до ущільнення вібропресуванням та міцнісні характеристики бетону. Отримані математичні моделі впливу факторів складу вібропресованого фібробетону на його механічні та технологічні властивості дали можливість запропонувати спосіб проєктування складу такого бетону із забезпеченням комплексу необхідних параметрів та мінімальної вартості компонентів.*

Ключові слова: *бетон, вібропресування, фібра, математичне планування експерименту, рівняння регресії, проєктування складу.*

Вступ

Для дорожнього будівництва важливим є забезпечення підвищеної міцності матеріалів на розтяг та їх довговічності в умовах інтенсивних атмосферних впливів. У даному випадку високу ефективність показує дисперсне армування цементних бетонів різними видами фібри. При виготовленні дрібноштучних дорожніх елементів добре зарекомендувала себе технологія вібропресування, котра дозволяє забезпечити високі механічні властивості виробів та значну продуктивність при заводському виготовленні. Поряд із цим, у разі застосування вібропресування відкритим залишається питання дисперсного армування, котре значно ускладнює технологічний процес.

Аналіз публікацій

Дисперсне армування бетонів, що виготовляються з рухомих сумішей, пов'язане з рядом технологічних проблем [1]. Серед них найбільш значними є можливість розшарування суміші, переміщення фібри (особливо сталевої) під час ущільнення та складність забезпечення однорідності властивостей за перерізом конструкції. Уникнення значної кількості таких проблем може бути досягнуте за рахунок використання жорстких та наджорстких сумішей і ущільнення їх силовими методами відповідної інтенсивності (вібрування, віброекструзія, вібрування з при вантаженням, вібропресування). Відомі рекомендації з проєктування та виготовлення сталефібробетонних конструкцій [2] регламентують використання певних видів обладнання для формування сумішей з різною легкоукладальністю. Однак технологічні особливості отримання дрібнозернистих фібробетонних виробів з жорстких та наджорстких сумішей потребують подальшої розробки. Також відсутня методика проєктування складу дрібнозернистого фібробетону, що виготовляється з жорстких сумішей, яка б враховувала необхідні властивості бетону та технологічні параметри сумішей.

Введення дисперсних армуючих волокон до складу наджорсткої суміші, що ущільнюється вібропрасуванням, суттєво змінює властивості суміші та її здатність до ущільнення, особливо у випадку використання сталевої фібри. Це призводить до досить обмеженого використання такої технології. Найбільшого поширення набула технологія отримання вібропресуванням сталефібробетонних труб та інших виробів кільцевого перерізу (колодязних, каналізаційних кілець тощо), які, через малий переріз та високу жорсткість суміші, складно армувати звичайною арматурою. Однак результати досліджень вібропресованого сталефібробетону, що проводились [3–5] показують можливість отримання матеріалу, для якого є характерним суттєве покращення міцнісних та деформативних властивостей. Використання інших волокон (базальтових, скляних, полімерних чи волокон органічного походження) є, зазвичай, менш ефективним, ніж сталевих, однак внаслідок їх менших розмірів та вищих деформативних характеристик у меншій мірі впливає на властивості бетонних сумішей та їх формувальність [6]. Саме тому технологія

вібропресування бетонних виробів, армованих неметалевою фіброю, у науковій літературі досить широко висвітлена [7].

Мета і постановка завдання

Для встановлення технологічних параметрів отримання високоміцного фібробетону, отриманого з наджорстких сумішей і ущільненого вібропресуванням та розробки способу проєктування його складу було проведено серію експериментів з використанням математичного планування. На першому етапі досліджень в якості дисперсних волокон було використано сталеву анкерну фібру; друга серія була присвячена вібропресуванню сумішей з базальтовою фіброю.

Основні результати дослідження

Сталева фібра. З метою встановлення впливу параметрів складу вібропресованого сталефібробетону та отримання кількісних залежностей основних властивостей для використання їх під час проєктування складу був проведений планований експеримент шляхом реалізації типового плану другого порядку B_4 для чотирьох факторів [8]. Досліджувані фактори та межі їх варіювання наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	–1	0	+1	
Вміст фібри (Ф), кг/м^3	X_1	0	50	100	50
Вміст повітрявтягувальної добавки (СДО), %	X_2	0	0,05	0,1	0,05
Витрата цементу (Ц), кг/м^3	X_3	400	500	600	100
Довжина фібри (L), мм	X_4	10	30	50	20

Зразки-куби з розміром ребра 10 мм виготовлялись з наджорсткої бетонної суміші на лабораторному вібромайданчику з оптимальними параметрами вібропресування, характерними для більшості промислових вібропресів (частота – 50 Гц, амплітуда – 0,5 мм, величина тиску (привантаження) – 0,06 МПа, тривалість – 10 с). Привантаження створювалось за допомогою спеціально розробленої важільної установки, яка забезпечувала необхідний тиск за зменшеної маси вантажу та зручність негайного звільнення відформованих зразків від форми. Водопотреба бетонної суміші визначалась методом поступового збільшення витрати води до появи перших ознак відтискання. Для оцінки ущільнення зразки піддавались визначенню середньої густини одразу ж після формування (ρ_o). Зразки тверділи у нормальних умовах. Після тверднення протягом 28 діб проводились випробування міцності при стиску та розтягу при розколюванні.

В результаті статистичної обробки експериментальних даних були отримані адекватні, з довірчою ймовірністю 95 %, рівняння регресії таких вихідних параметрів: водопотреби (В, л/м^3), середньої густини ущільненої бетонної суміші (ρ_o, кг/м^3), міцності при стиску (f_c, МПа) та на розтяг при розколюванні ($f_{c,tn}$, МПа) у віці 28 діб. Форма рівняння наведена нижче, значення відповідних коефіцієнтів – у табл. 2:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{11}X_1^2 + \\ + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + \\ + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4.$$

Усі досліджені фактори викликають зміну водопотреби бетонної суміші. Найбільш впливовою в даному випадку є витрата цементу (X_3), причому характер ефекту даного фактора, а також вмісту повітрявтягувальної добавки (X_2) такий, як і в експериментах без фібри. Фактори X_1 та X_4, котрі характеризують кількість та довжину сталевої фібри, теж суттєво впливають на водопотребу вібропресованого бетону. Як і очікувалось, введення сталевих волокон погіршує формівні властивості наджорсткої бетонної суміші, тому вимагає деякого збільшення витрати води. В меншій мірі, але також збільшується водопотреба суміші за підвищення довжини фібри: більш довгі волокна погано розподіляються і погіршують ущільнення, вимагаючи більш рухомої суміші. Фактор X_2 (вміст повітрявтягувальної добавки СДО) викликає зниження водопотреби внаслідок пластифікації, ймовірно викликаної відомим ефектом «підшипника» за рахунок мікробульбашок втягнутого повітря.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів рівнянь регресії під час дослідження впливу сталевої фібри

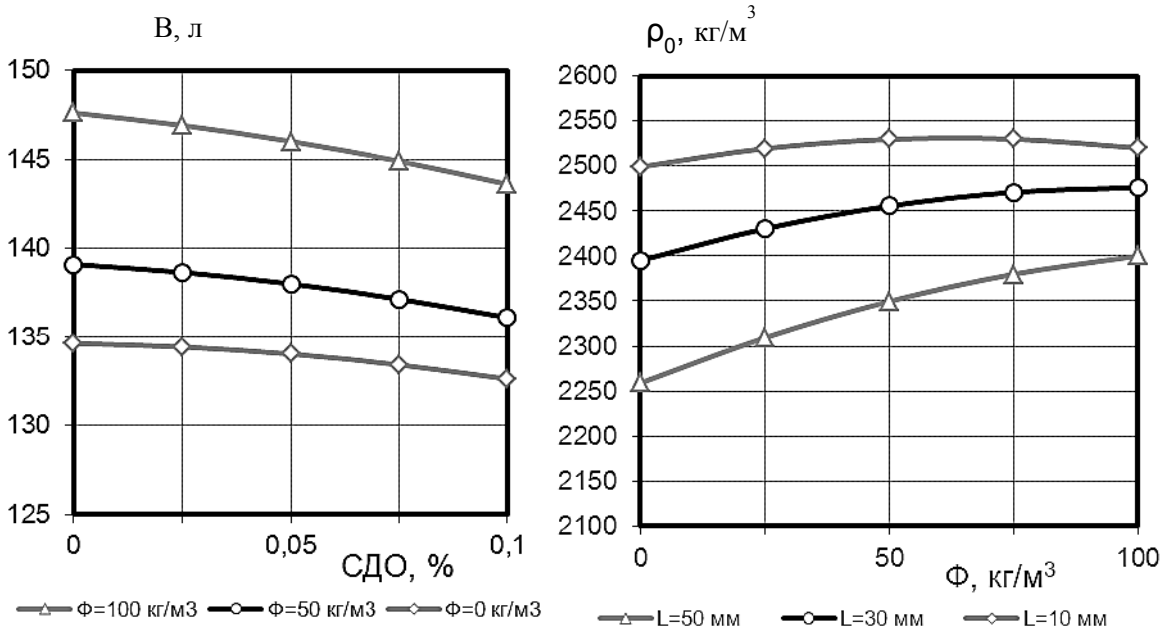
Коефіцієнти	Вихідні параметри			
	B, л/м^3	$\rho_{o,}$ кг/м^3	f_c, МПа	$f_{c,tn}$, МПа
b_0	138	2456	90,25	10,3
b_1	6	40,5	6,75	4,19
b_2	-1,5	22	2,75	0,31
b_3	18	33,2	15,6	1,88
b_4	4	-90	3	1,56
b_{11}	2	-20	-1,31	-0,26
b_{22}	-0,4	-12	-7	-0,78
b_{33}	5,1	-26	-8	-0,89
b_{44}	1,5	-16	-1,6	0,33
b_{12}	-0,5	10,5	-1,25	-0,19
b_{13}	-3	15,16	2,78	0,53
b_{14}	2	30	3	0,56
b_{23}	-1,4	10,64	4,62	0,51
b_{24}	-0,3	30,8	1,4	0,20
b_{34}	-2,2	40,4	4,2	0,91

У моделі водопотреби вібропресованого фібробетону помітний вплив мають коефіцієнти взаємодії факторів. Найбільш важливими, на наш погляд, є коефіцієнти b_{14}, b_{12}, b_{13}. Коефіцієнт b_{14}, що характеризує взаємодію кількості й довжини фібри, має «позитивний» знак і показує, що ефект підвищення водопотреби зі збільшенням кількості фібри знижується за зменшення її довжини: коротка фібра краще розподіляється і практично не перешкоджає ущільненню бетону, тому водопотребу майже не підвищує. Коефіцієнти взаємодії вмісту фібри з витратою цементу та кількістю добавки СДО – негативні: підвищення витрати цементу і пластифікуючої добавки внаслідок підвищення формувальних властивостей суміші зменшують відмічений вище негативний вплив кількості фібри на водопотребу.

Модель середньої густини фібробетону після формування в основному найкраще показує, як поводиться наджорстка бетонна суміш з фіброю при ущільненні вібропресуванням. Середня густина змінювалась у широкому діапазоні – від 2130 до 2530 кг/м^3. Слід відмітити, що вплив факторів, які відображають особливості ущільнення бетону на середню густину, та їх взаємодія в більшості випадків добре корелюють модель водопотреби, оскільки визначаються тими ж самими фізичними процесами (рис. 1). Фактор X_1 (витрата фібри), незважаючи на те, що знижує ущільнюваність бетонної суміші при вібропрасуванні, викликає підвищення середньої густини фібробетону за рахунок введення більш важкого компонента. Так само, як і можна було очікувати, збільшення довжини фібри (фактор X_4) призводить до зниження середньої густини бетону, однак ступінь негативного впливу даного фактора знижується з підвищенням витрати цементу та добавки СДО. Залежність середньої густини бетону від вмісту повітрявтягувальної добавки (рис. 1) має яскраво виражений екстремальний характер, що свідчить про наявність області її оптимального вмісту в досліджених межах варіювання. В даному випадку зниження густини бетону, ймовірно, викликане надмірним втягненням повітря у бетонну суміш.

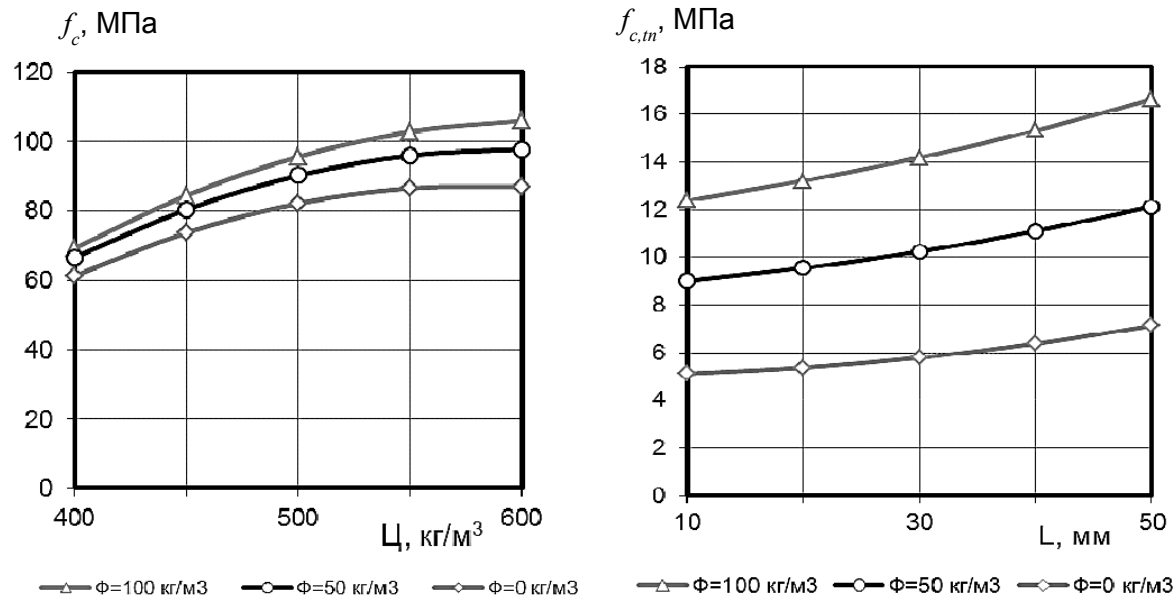
Введення сталевої фібри до складу вібропресованого бетону викликає підвищення міцних показників як на розтяг при розколюванні, так і на стиск. Так, приріст міцності при стиску спостерігається в середньому в межах 10…17 % (до 80…100 МПа), міцності на розтяг при розколюванні – 25…46 % (до 9…12 МПа) (рис. 2). Тобто дисперсне армування високоміцних вібропресованих бетонів дає ефект, подібний до поміченого нами у бетонах із рухомих сумішей [9]. Вміст сталевої фібри та її довжина значно впливають на властивості наджорстких сумішей та їх здатність до ущільнення, тому вплив фібри на міцнісні показники вібропресованого фібробетону добре корелює з водопотребою та середньою густиною бетону: взаємодії факторів у відповідних рівняннях регресії мають подібний характер. Підвищення ефективності введення фібри у наджорсткі суміші спостерігається при забезпеченні умов, що сприяють максимально легкому ущільненню. За збільшення кількості цементного тіста та пластифікуючої добавки, зменшення довжини волокон ефект дисперсного армування вищий (рис. 2).

Таким чином, дисперсне армування бетонів з наджорсткої суміші сталевою фіброю пов’язане з ускладненим розподілом фібри, що викликає необхідність підвищення водовмісту, введення невеликої кількості пластифікуючо-повітрявтягувальних добавок. Ефективним у даному випадку є також зменшення довжини фібри. Вібропресований сталефібробетон має підвищені значення міцності на розтяг при розколюванні та стиск, а також ударної міцності, що дозволяє його рекомендувати для виготовлення дорожніх елементів.



а б

Рис. 1. Графіки залежностей водопотреби і середньої густини бетону від вмісту фібри та СДО (а) і вмісту сталевої фібри та її довжини (б)



а б

Рис. 2 – Графіки залежності міцності бетону на стиск (а) та на розтяг при згині (б) від: а – витрати цементу та вмісту СДО; б – вмісту сталевої фібри та її довжини

Базальтова фібра. Як вказують дані літературних джерел [5–7], для вібропресованого бетону внаслідок ускладненого розподілення та ущільнення бетонної суміші, котра має низьку вологість, більшою ефективністю характеризується використання неметалевої фібри. Неметалеві волокна (скляні, базальтові, полімерні), зазвичай, мають менший діаметр та довжину, порівняно зі сталевими, а також мають більшу деформативність, тому краще розподіляються і не заважають ущільненню бетонної суміші.

Для вивчення впливу базальтової фібри на міцнісні характеристики вібропресованого

бетону було проведено серію дослідів з використанням математичного планування експерименту. Експеримент проводився за трирівневим планом B_3 (табл. 3). В якості факторів було взято наступні: вміст портландцементу, фібри (рублений базальтовий ровінг довжиною 12 мм, товщиною 0,5 мм) та добавки СДО.

Таблиця 3 – Умови планування експерименту

№ з/п	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
1.	Витрата цементу (Ц), кг/м^3	X_1	300	450	600	150
2.	Вміст фібри (Ф), %	X_2	0	1	2	1
3.	Вміст повітрявтягувальної добавки (СДО), %	X_3	0	0,05	0,1	0,05

Перемішування суміші виконувалося у два етапи в сухому вигляді (ПЦ, пісок з відсівів (2,5…5 мм), пісок, фібра базальтова) з додаванням води та розчиненої в ній добавки СДО. Після перемішування суміш завантажували у форму (40×40×160 мм) та ущільнювали вібропресуванням протягом 20 с; потім зразки протягом 28 діб витримувались у вологих умовах і піддавались випробуванню на міцності на стиск та згин.

Вихідними параметрами були вибрані водопотреба бетону (В, л/м^3), середня густина (ρ_0, кг/м^3), міцність при стиску (f_c, МПа), міцність на розтяг при згині ($f_{c,tf}$, МПа) .

Після статистичної обробки результатів були отримані рівняння регресії виду:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3.$$

Коефіцієнти отриманих рівнянь наведені у табл. 4.

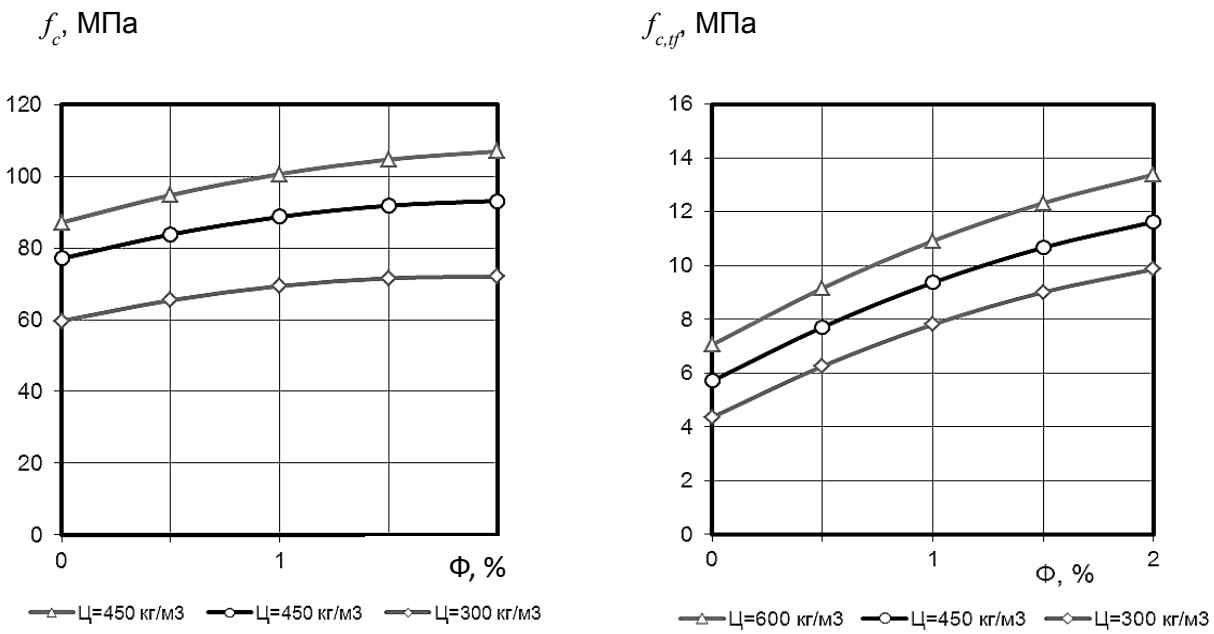
Як показують результати експерименту, базальтова фібра значно краще розподіляється під час перемішування і, на відміну від сталевої, менше перешкоджає ущільненню. І хоча внаслідок своєї дисперсності базальтові волокна дещо підвищують водопотребу наджорсткої суміші, недоущільнення не спостерігається і додаткової води, для зниження жорсткості, суміш не потребує. В деякій мірі введення такої фібри внаслідок дисперсного армування маси покращує формівні властивості, підвищує середню густину, формувальну міцність, що є дуже важливим для вібропресованих бетонів, що підлягають негайному звільненню з форми. Підвищення густини спостерігається до деякої межі кількості фібри (0,3…0,6 %), далі ρ_0 дещо знижується. Граничне значення кількості фібри зсувається у бік збільшення з підвищенням вмісту цементу в суміші. Також підвищення середньої густини та зниження водовмісту бетонної суміші викликає фактор X_3 (вміст добавки СДО).

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів рівнянь регресії під час дослідження впливу базальтової фібри

Коефіцієнти	Вихідні параметри			
	B, л/м^3	ρ_o, кг/м^3	f_c, МПа	$f_{c,\,tf}$, МПа
b_0	131	2394	87,3	8,9
b_1	61,4	61	18,4	1,9
b_2	-13,6	-14	7,8	2,5
b_3	26,2	26	7,5	0,8
b_{11}	3,2	3	-3,7	0,0
b_{22}	-17,8	-18	-3,6	-0,7
b_{33}	-25,8	-26	-6,1	-0,3
b_{12}	9,9	10	1,9	0,2
b_{13}	1,1	1	-2,8	-0,4
b_{23}	12,0	12	0,3	0,5

Базальтова фібра, як і сталева, спричиняє підвищення міцності високоміцного вібропресованого бетону як на розтяг при згині (1,8…2 рази), так і на стиск (20…22 %). Інші фактори, вплив яких досліджувався (витрата цементу та добавки), теж сприяють підвищенню міцнісних характеристик, однак у більшій мірі, все-таки, впливають на міцність при стиску (рис. 3).

Отримані математичні моделі (табл. 2, 4) дають можливість проєктувати склад вібропресованого фібробетону за заданими параметрами міцності при стиску та розтягу. Враховуючи те, що при проєктуванні складу фібробетону через високу вартість фібри мінімальна витрата цементу не завжди забезпечує найменшу вартість, слід додатково вводити критерій сумарної мінімальної вартості компонентів.



а б

Рис. 3. Графіки залежності міцності вібропресованого бетону на стиск (а) та згин (б) від витрати цементу (Ц, кг/м^3) та вмісту базальтової фібри (Ф, %)

Для розрахунку складу бетону за математичними моделями, з урахуванням кількох критеріїв (наприклад міцності бетону при стиску та згині не менше заданого показника, а також мінімальної сумарної вартості компонентів), можна застосовувати різні методи математичної оптимізації [10]. Досить зручним для вирішення завдань багатопараметричного проєктування складу бетону є використання оператора програми «MS Excel» «Пошук рішення» («Solver») [11]. У такому випадку метод визначення складу вібропресованого фібробетону полягає у наступному:

1. За відповідними математичними моделями, за заданих умов (необхідна міцність при стиску та розтягу, сумарна мінімальна вартість компонентів та ін.) визначаються значення факторів X_1-X_4, що їх задовольняють.

2. Здійснюємо перерахунок від кодованих значень до натуральних і отримуємо значення витрати цементу (Ц, кг/м^3, витрата фібри (Ф, % від об'єму бетону), витрата добавки (СДО, % від цементу):

$$\text{Н} = X_i \cdot \Delta H_i + H_{i0},$$

де X_i – кодоване значення фактора, H – значення фактора у натуральних одиницях, ΔH_i та H_{i0} – інтервал варіювання та значення фактора на нульовому рівні (табл. 1 та 3) відповідно.

3. За рівнянням водопотреби (табл. 2, 4), підставляючи отримані значення факторів, знаходимо відповідну витрату води В.

4. Витрату заповнювача можна розрахувати, знаючи об'єм цементного тіста ($V_{\text{ц.т}}$) в бетонній суміші.

Об'єм цементного тіста, л/м^3:

$$V_{\text{ц.т}} = \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + B.$$

Об'єм заповнювача, л/м^3:

$$V_{\text{з}} = 1000 - V_{\text{ц.т}}.$$

Витрата заповнювача З, кг/м^3 :

$$\text{З} = \rho_{\text{з}} V_{\text{з}}.$$

У наведених вище формулах $\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{з}}$ – дійсна густина цементу та заповнювача.

5. Знаючи витрати компонентів, знаходимо витрати фібри та добавки.

6. Проводимо лабораторну перевірку отриманого розрахункового складу.

Висновки

Таким чином, дисперсне армування вібропресованого бетону базальтовою фіброю дозволяє отримати значення міцності на розтяг при згині в межах 10…13 МПа. Така міцність є на 40…50 % нижчою ніж при викори-

станні сталевої фібри, однак при вібропресуванні базальтові волокна більш технологічні: покращують формувальні властивості, забезпечують більшу однорідність бетону, дозволяють виготовляти вироби з меншою товщиною і будь-якої складної конфігурації. Це дає змогу рекомендувати такий матеріал для отримання дрібноштучних дорожніх елементів. Отримані математичні моделі дають змогу проєктувати склад бетону з комплексом заданих параметрів.

Література

1. Concrete Mix Design, Quality Control, and Specifications/ Ken W. Day. 3rd Ed, 2006, p.380.
2. Руководящие технические материалы по проектированию, изготовлению и применению сталефибробетонных конструкций на фибре из стальной проволоки. РТМ-17-03-2005. НИИЖб, Москва, 2005, 80 с.
3. Усачев С. М. Совершенствование технологии вибропрессованных бетонов путем оптимизации баланса внутренних и внешних сил: дис. канд. техн. наук : 05.23.05 / Усачев С. М. – Воронеж, 2006. – 212 с.
4. Батяновский, Э. И. Вибропрессованный бетон: технология и свойства / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович; Белорусский национальный технический университет. - Минск : БНТУ, 2018. – 262 с.
5. Давиденко М.А. Прочностные и деформативные характеристики сталефибробетонных труб вертикального вибропрессования / М.А. Давиденко, Н.Д. Высоцкая // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. – 2012. – № 41. – С. 269–275.
6. H. Nakagawa, S. Akihama And T. Suenaga, (1989). Mechanical Properties Of Various Types Of Fibre Reinforced Concretes. In Proc. Int. Conf. Reinforced Cements And Concretes: Recent Developments, Cardiff, R.N. Swamy B. Barr, London; Elsevier Applied Science: pp. 523-533
7. Андрійчук О.В. Робота і розрахунок елементів кільцевого перерізу зі сталефібробетону при повторних навантаженнях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / О.В. Андрійчук. – Львів, 2008 – 20 с.
8. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011. - 174 с.
9. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони /Дворкін Л.Й., Бабич Є.М., Житковський В.В., Бордюженко О.М. та ін. Рівне. НУВГП. 2017. - 331 с.
10. Мартинюк П. М. Методи оптимізації та дослідження операцій: навч. посіб. / П. М. Мартинюк, О. Р. Мічута. – Рівне : НУВГП, 2011. – 283 с.
11. Кочкарьов Д.В. Встановлення аналітичних залежностей багатопараметричних функцій на прикладі визначення норм витрат цементу / Кочкарьов Д.В., Дворкін Л.Й., Житковський В.В. - МОСК-18 Одеса, 2018. С.152-157.

References

1. Concrete Mix Design, Quality Control, and Specifications/ Ken W. Day. 3rd Ed, 2006, p.380.
2. Rukovodyashchiye tekhnicheskiye materialy po proyektirovaniyu, izgotovleniyu i primene-niyu stalefibrobetonykh konstruktsiy na fibra iz stal'noy provoloki. [Guiding technical materials for the design, manufacture and application of reinforced concrete structures on steel wire fiber] RTM-17-03-2005. NIIZHB, Moskva, 2005, 80 p.[in Russian]
3. Usachev S. M. Sovershenstvovaniye tekhnologii vibropressovannykh betonov putem optimizatsiy balansa vnutrennikh i vneshnikh sil [Improving the technology of vibropressed concrete by optimizing the balance of internal and external forces]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / Usachev S. M. - Voronezh, 2006. - 212 p. [in Russian]
4. Batyanovskiy, E. I. vibropressovannyy be-ton: tekhnologiya i svoystva [Vibropressed concrete: technology and properties] / E. I. Batyanovskiy, A. I. Bondarovich; Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskiy universitet. - Minsk: BNTU, 2018. - 262 p. [in Russian]
5. Davydenko M.A. Prochnostnyye i deformatyvnyye kharakteristiki stalefibrobetonnykh trub vertikal'nogo vibropressovaniya [Strength and deformable characteristics of steel-fiber concrete pipes of vertical vibropressing] / M.A. Davydenko, N.D. Vysotskaya // Nauchnyy visnik Luganskogo natsional'nogo agrarnogo universiteta. - 2012. - № 41. - p. 269-275. [in Russian].
6. H. Nakagawa, S. Akihama And T. Suenaga, (1989). Mechanical Properties Of Various Types Of Fibre Reinforced Concretes. In Proc. Int. Conf. Reinforced Cements And Concretes: Recent Developments, Cardiff, R.N. Swamy B. Barr, London; Elsevier Applied Science: pp. 523-533.
7. Andreychuk A.V. Rabota i raschet ele-tov kol'tsevogo secheniya iz stalefibrobetona pri povtornykh nagruzkakh [Work and calculation of elements of annular section from steel fiber concrete at repeated loadings]: Avtoref. dis. na polucheniye nauk. stepeni kand. tekhn. nauk: spets. 05.23.01 "Stroitel'nyye konstruktsii, stro-

vli i sooruzheniya" / A.V. Andreychuk. - L'vov, 2008 - 20 p. [in Ukrainian]
8. Dvorkin L.I. Resheniye stroitel'no-tekhnologicheskikh zadach metodami matematicheskogo planirovaniya eksperimenta [Solving construction and technological problems by methods of mathematical planning of the experiment] / L.I. Dvorkin, A.L. Dvorkin, V.V. Zhitkovs'kiy. - Rovno: NUVKHP, 2011-174 p. [in Ukrainian]
9. Dvorkin L.I. Vysokoprochnyye bystrotver-deyushchiye betony i fibrobetony.[High-strength fast-setting concretes and fibroconcretes] / Dvorkin L.I., Babich Ye.M., Zhitkovs'kiy V.V., Bordyuzhenko A.N. i dr. Rovno. NUVKHP. 2017. - 331 p. [in Ukrainian]
10. Martynyuk P. M. Metody optimizatsii i napravlenii issledovaniy operatsiy [Methods of optimization and research of operations]: ucheb. posobiye. / P. M. Mar-tinyuk, A. G. Michuta. - Rovno: NUVKHP, 2011. - 283 p [in Ukrainian].
11. Kochkarev D.V. Ustanovleniye analiticheskikh zavisimostey mnogoparametricheskikh funktsiy na primere opredeleniya norm raskhoda tsemen-ta. [Establishment of analytical dependences of multiparameter functions on the example of determining the norms of cement consumption] / Kochkarev D.V., Dvorkin L.I., Zhitkovskiy V.V. - MOSK-18 Odessa, 2018.-p.152-157. [in Ukrainian].

Житковський Вадим Володимирович, доц., канд. техн. наук, кафедра технології будівельних виробів і матеріалознавства, Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна 11, м. Рівне, 33028, тел. +38096-564-00-27,
v.v.zhitkovsky@nuwm.edu.ua
Дворкін Леонід Йосипович, проф., докт. техн. наук, кафедра технології будівельних виробів і матеріалознавства, Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна 11, м. Рівне, 33028,
тел. +38068-353-33-38, l.i.dvorkin@nuwm.edu.ua

Influence of dispersed reinforcement on properties of road concrete obtained by vibropressing semi-dry mixtures

Abstract. Problem and goal. *The results of research of influence of dispersed reinforcement on properties of concrete semi-dry mixes, their ability to consolidation by vibropressing and strength characteristics of the received concrete are resulted.* ***Metodology and result.*** *In the first stage of research, steel anchor fiber was used as a dispersed fiber, the second stage was devoted to vibropressing mixtures with basalt fiber. In order to establish the influence of the parameters of the composition of vibropressed reinforced concrete and to obtain quantitative dependences of the main properties for their use in the design of the composition, a planned experiment was conducted. The regression equations for water consumption, average density of compacted concrete mixture, compressive strength and tensile strength during splitting at the age of 28 days were obtained. The analysis of the obtained equations showed that the dispersed reinforcement of concretes from semi-dry mixture with steel fiber is associated with a complicated distribution of fiber, which necessitates an increase in water content, the introduction of increased amounts of plasticizers. Vibropressed reinforced concrete has increased values of tensile strength in splitting and compression, which allows it to be recommended for the manufacture of road elements. It was found that basalt fiber is much better distributed during mixing and, unlike steel, less interferes with compaction. Disperse reinforcement of vibropressed concrete with basalt fiber allows to obtain values of tensile strength in bending within 10…13 MPa. This strength is 40…50% lower than when using steel fiber, but when vibropressing basalt fibers are more technological: improve the molding properties, provide greater homogeneity of concrete, allow to produce products with less wall thickness and any complex configuration.* ***Originality.*** *The obtained mathematical models of influence of factors of composition of vibropressed fibroconcrete on its mechanical and technological properties gave the chance to offer a way of designing of structure of such concrete with maintenance of a complex of necessary parameters and the minimum cost of components.*

Key words: *concrete, vibropressing, fiber, mathematical planning of the experiment, regression equation, composition design.*