

## **Жорсткі дорожні покриття**

**Наукова робота на тему :  
«Дослідження властивостей фібробетонів жорстких дорожніх покриттів»**

**Одеса 2020**

	Зміст	
Вступ		3
Аналіз останніх досліджень та публікацій		4
Характеристика використаних в дослідженнях матеріалів		5
Методика досліджень фізико-механічних властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів		6
План проведених досліджень і варійовані в експериментах фактори		7
Вплив складу бетону на В/Ц сумішей рівної рухомості		9
Міцність при стиску досліджених бетонів у різному віці		11
Міцність досліджених бетонів на розтяг при згині у різному віці		16
Морозостійкість бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів		20
Висновки		22
Література		23

## Вступ

Стратегія розвитку транспортної інфраструктури України передбачає збільшення частки доріг з жорстким цементобетонним покриттям. Жорсткі дорожні покриття мають багато експлуатаційних переваг, основними з яких є відсутність колійності та більша довговічність в порівнянні з асфальтобетонними покриттями. Цементобетонне покриття розподіляє навантаження на більшу площу земляного полотна в порівнянні з більш «гнучким» асфальтобетоном, в темний час доби відбиває світло краще ніж асфальт, що забезпечує хорошу видимість для водіїв.

Завдання підвищення довговічності бетонів жорстких покриттів автомобільних доріг залишається актуальним, тому що його вирішення дозволяє подовжити міжремонтні інтервали і відповідно знизити витрати на утримання доріг в процесі експлуатації. Основними показниками якості, що обумовлюють довговічність бетонів дорожніх покриттів в кліматичних умовах України та більшості європейських країн є морозостійкість та зносостійкість.

Також важливим є те, що при влаштуванні покриттів з цементобетону починати їх експлуатацію можна лише після набору бетоном проектної міцності, що потребує відносно тривалого твердіння матеріалу. Відповідно також актуальною є задача розробки бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з підвищеною ранньою міцністю.

Вирішити задачі підвищення морозостійкості, зносостійкості та ранньої міцності бетонів жорстких покриттів автомобільних доріг можливо за рахунок застосування комплексних модифікаторів: хімічних добавок, що мають пластифікуючий і прискорюючий ефект, а також активних мінеральних добавок і дисперсного армування. При цьому з врахуванням значних об'ємів бетонних робіт при влаштуванні дорожніх покриттів бажано спиратися на вітчизняну сировинну базу всіх компонентів бетону, включаючи модифікатори і фібру.

## **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

Жорсткі цементобетонні покриття відрізняються високими експлуатаційними властивостями та при забезпеченні необхідної якості бетону мають високу довговічність [1,2]. У розвинутих країнах світу частка доріг з цементобетонними покриттями зростає рік від року. Сучасна економічна ситуація в Україні, зокрема необхідність імпортувати бітум, сприяє більш широкому використанню цементобетонів при влаштуванні дорожніх покриттів [3].

На сучасному етапі розвитку будівельних технологій найбільш ефективним методом забезпечення необхідної міцності і довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів є застосування ефективних модифікаторів, зокрема суперпластифікаторів полікарбосилатного типу [1,4]. Використання суперпластифікаторів в комплексі з активними мінеральними добавками пуцоланового типу дозволяє досягати найбільшого ефекту у вирішенні завдання забезпечення як ранньої, так і проектної міцності бетону, що важливо для дорожніх покриттів з позиції термінів початку їх експлуатації [1,5]. На сьогодні найбільш доступною і одночасно достатньо якісною добавкою пуцоланового типу на ринку України є метакаолін [5].

Для дорожніх покриттів крім міцності при стиску важливими показниками якості є міцність на розтяг при згині, яка саме і забезпечує функціональну придатність бетону в умовах робочих навантажень на дорожній одяг, а також морозостійкість і зносостійкість бетону, які в значній мірі забезпечують довговічність покриття. Суттєво підвищити зазначені фізико-механічні показники дозволяє застосування дисперсного армування бетону [5]. При цьому з врахуванням інтенсивного впливу на дорожні покриття атмосферних факторів одночасно з механічним зносом необхідно використовувати стійку до корозії фібру, зокрема поліпропіленову [5,6]. Таким чином, завдання забезпечення довговічності та міцності бетонів жорстких дорожніх покриттів, з

врахуванням їх ранньої міцності, може бути вирішено за рахунок використання комплексних модифікаторів і дисперсного армування [6,7].

### **Характеристика використаних в дослідженнях матеріалів**

При вивченні структури і властивостей бетонів і фібробетонів для жорстких покриттів автомобільних доріг використовувалися перелічені нижче матеріали.

В якості в'язучих використовувався портландцементу ПЦ П/А-Ш-500 виробництва ПАТ «Дікергофф Цемент Україна», філія «ЮГЦемент», Ольшанський цементний завод (ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Цементи загальнобудівельного призначення). Питома поверхня даного цементу складає 300 м<sup>2</sup>/кг.

У якості заповнювачів для бетонів в дослідженнях використовувалися наступні матеріали.

Кварцовий пісок з модулем крупності 2,7. Походження піску – Микитівський кар'єр Вознесенського району Миколаївської області. Насипна густина піску 1410 кг/м<sup>3</sup>. Пісок відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95. Випробування піску здійснювалося згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 «Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань». Для видалення пилюватих і глинистих часток з піску він промивався водою, після чого просушувався на повітрі.

Також в дослідженнях при виготовленні фібробетонів використовувалася поліпропіленова фібра з довжиною волокон 12 мм і діаметр 20 мкм.

Для приготування бетонних сумішей використовувалася вода, яка відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011 «Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови».

## **Методика досліджень фізико-механічних властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів**

Рухомість бетонних сумішей визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002 «Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань».

Перемішування бетонних сумішей проводилося в лабораторному змішувачі примусового типу.

Твердіння бетонних зразків відбувалося в нормальних (стандартних) умовах, тобто при температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  і 100% вологості.

Міцність бетону при стиску визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-224:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Правила контролю міцності» на зразках кубах з ребром 10 см. Міцність на розтяг при згині визначалася на зразках балочках розміром  $4 \times 4 \times 16$  см.

Морозостійкість бетонів жорстких дорожніх покриттів визначалася прискореним методом в солоній воді при заморожуванні до  $-50^\circ\text{C}$  згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 «Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні» (третій метод).

При проведенні експериментальних досліджень і аналізі їх результатів застосовувалися методики планування експерименту і експериментально-статистичного моделювання [8].

Для розрахунку експериментально-статистичних (ЕС) моделей виконувався перехід від натурних перемінних до кодованих, які мають знаходитися діапазоні від  $-1$  до  $+1$ . Для цього використовувалася типова формула:

$$x_i = \frac{X_i - \frac{X_{i,\max} + X_{i,\min}}{2}}{\frac{X_{i,\max} - X_{i,\min}}{2}} \quad (1)$$

Для розрахунку і статистичного аналізу ЕС-моделей впливу складу досліджених бетонів і сумішей на їх фізико-механічні властивості використовувалася діалогова система (програма) COMPEX.

### **План проведених досліджень і варійовані в експериментах фактори**

При дослідженні властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів за оптимальним планом проводився 4-х факторний експеримент [8], в якому варіювалися наступні фактори складу бетону:

$X_1$  – кількість портландцементу ПЦ П/А-Ш-500, від 400 до 500 кг/м<sup>3</sup>;

$X_2$  – кількість поліпропіленової фібри, від 0 до 2 кг/м<sup>3</sup>;

$X_3$  – кількість метакаоліну, від 0 до 30 кг/м<sup>3</sup>;

$X_4$  – кількість добавки комплексної дії (полікарбоксилатного типу) Coral ExpertSuid-5, від 0,6 до 1% від маси цементу.

План експерименту і складу досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів наведені у таблиці 1.

Кількість заповнювачів, тобто щебеню і кварцового піску в бетонних сумішах при проведенні експериментів корегувалася відповідно до відомих методів підбору складу бетонів для забезпечення необхідного розрахункового об'єму матеріалу на 1 м<sup>3</sup> в залежності від кількості цементу, води, фібри, добавки.

Всі суміші досліджених в обох серіях експериментів керамзитобетонів мали рівну рухомість Р2 (ОК від 6 до 8 см), що досягалося підбором кількості води. Така рухомість була обрана з врахуванням найбільш розповсюджених вимог до бетонних сумішей жорстких дорожніх покриттів.

План експерименту і склади досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів

№	Рівні факторів				Склади бетонів						
	$x_1$ (цемент)	$x_2$ (фібра)	$x_3$ (метакаолін)	$x_4$ (добавка)	Цемент (кг/м <sup>3</sup> )	Щебінь (л/м <sup>3</sup> )	Пісок (кг/м <sup>3</sup> )	Метакаолін (кг/м <sup>3</sup> )	Фібра (кг/м <sup>3</sup> )	Добавка (кг/м <sup>3</sup> )	Вода (л/м <sup>3</sup> )
1	0	0	0	0	450	1115	655	15	1	3,6	183
2	-1	-1	1	-1	400	1130	668	30	0	2,4	191
3	-1	1	-1	1	400	1135	692	0	2	4	193
4	1	-1	-1	1	500	1105	635	0	0	5	168
5	1	1	1	1	500	1100	603	30	2	5	181
6	1	1	-1	-1	500	1105	621	0	2	3	192
7	0	1	1	-1	450	1115	617	30	2	2,7	206
8	0	-1	-1	-1	450	1115	684	0	0	2,7	161
9	0	-1	1	1	450	1115	651	30	0	4,5	164
10	1	0	1	-1	500	1105	574	30	1	3	203
11	-1	0	-1	-1	400	1130	691	0	1	2,4	192
12	-1	0	1	1	400	1130	672	30	1	4	182
13	1	-1	0	-1	500	1105	601	15	0	3	199
14	-1	1	0	-1	400	1130	676	15	2	2,4	199
15	-1	-1	0	1	400	1135	702	15	0	4	158
16	1	-1	1	0	500	1105	590	30	0	4	183
17	-1	1	1	0	400	1130	662	30	2	3,2	189
18	-1	-1	-1	0	400	1135	710	0	0	3,2	163



## Вплив складу бетону на В/Ц сумішей рівної рухомості

Суміші всіх досліджених в експериментах бетонів мали рівну рухомість R2 (ОК від 6 до 8 см), що досягалося підбором кількості води. Таке значення рухомості було обрано з врахуванням найбільш розповсюджених вимог до бетонних сумішей жорстких дорожніх покриттів. Відповідно водопотреба і В/Ц сумішей залежали від складу бетону. Рівні В/Ц сумішей у 18-ті точках планованого експерименту наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

В/Ц досліджених бетонних сумішей

№	В/Ц	№	В/Ц
1	0,406	10	0,406
2	0,478	11	0,480
3	0,483	12	0,455
4	0,336	13	0,398
5	0,361	14	0,497
6	0,384	15	0,396
7	0,458	16	0,366
8	0,358	17	0,473
9	0,364	18	0,408

За наведеними у таблиці 2 даними була побудована експериментально-статистична (ЕС) модель [8,9] впливу факторів складу на В/Ц бетонних сумішей жорстких дорожніх покриттів рівної рухомості:

$$\begin{aligned}
 \text{В/Ц} = & 0,403 - 0,043x_1 + 0,015x_1^2 - 0,010x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \\
 & + 0,021x_2 - 0,013x_2^2 - 0,008x_2x_3 + 0,004x_2x_4 \\
 & + 0,009x_3 \pm 0x_3^2 - 0,010x_3x_4 \\
 & - 0,018x_4 + 0,009x_4^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

За ЕС-моделлю (1) були побудовані показані на рис.1 однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів на В/Ц сумішей в зонах екстремумів, тобто проходять через максимальне (червоні лінії) і мінімальне (сині лінії) значення [8]. При побудові даних графіків рівні трьох не відображених на кожному з них факторів фіксувалися на значеннях, що забезпечують відповідно максимальне і мінімальне значення В/Ц суміші.

Аналіз наведених на рис.1 діаграм показує, що при підвищенні кількості портландцементу В/Ц сумішей очікувано знижується. Введення поліпропіленової фібри викликає необхідність підвищення В/Ц для збереження необхідної рухомості суміші. За рахунок додаткової водопотреби метаколіну при введенні даної активної мінеральної добавки В/Ц суміші також зростає. Підвищення кількості добавки Coral ExpertSuid-5 з 0,6 до 0,8% від маси цементу відчутно знижує В/Ц. Зростання кількості даної добавки комплексної дії до 1% викликає подальше, але менш відчутне, зниження В/Ц.

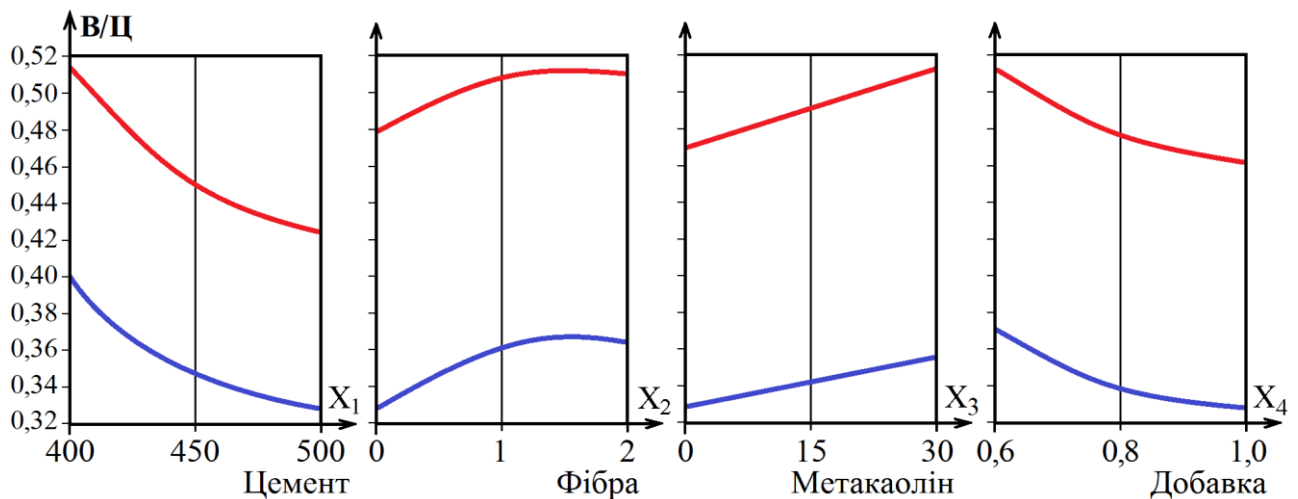


Рис.1. Вплив варійованих факторів складу на В/Ц бетонних сумішей рівної рухомості в зонах екстремумів

## Міцність при стиску досліджених бетонів у різному віці

Визначені у натурному експерименті значення міцності при стиску досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів у 18-ті точках планованого експерименту у віці 3-х, 7-ми і 28-ми діб наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Міцність при стиску досліджених бетонів  
жорстких дорожніх покриттів у різному віці

№	Міцність при стиску (МПа)		
	у віці 3-х діб, $f_{ck.cube.3}$	у віці 7-ми діб, $f_{ck.cube.7}$	у віці 28-ми діб, $f_{ck.cube}$
1	41,2	45,3	59,4
2	31,6	36,6	49,3
3	30,7	33,2	45,2
4	44,1	49,8	66,1
5	49,8	53,9	65,0
6	41,1	43,0	54,4
7	36,5	39,6	51,1
8	36,5	41,2	54,8
9	47,7	51,2	65,4
10	42,6	45,4	55,5
11	27,4	31,2	41,8
12	36,3	38,6	49,1
13	39,8	43,6	56,6
14	29,6	34,3	46,3
15	39,1	45,2	60,9
16	46,6	50,5	65,2
17	36,1	39,3	51,1
18	31,2	36,4	49,4

ЕС-моделі, побудована за наведеними у таблиці 2 даними і які описують вплив варійованих факторів складу на міцність при стиску досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів у ранньому віці, 3-х діб ( $f_{ck.cube.3}$ ) і 7-ми діб ( $f_{ck.cube.7}$ ) мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 f_{ck.cube.3}(\text{МПа}) = & 40,9 + 5,8x_1 - 1,7x_1^2 + 0,8x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \\
 & - 0,4x_2 + 0,9x_2^2 \pm 0x_2x_3 - 0,6x_2x_4 \\
 & + 2,1x_3 - 0,8x_3^2 + 1,0x_3x_4 \\
 & + 3,0x_4 - 1,1x_4^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 f_{ck.cube.7}(\text{МПа}) = & 45,4 + 5,7x_1 - 1,5x_1^2 + 1,1x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,8x_1x_4 \\
 & - 0,9x_2 + 1,2x_2^2 \pm 0x_2x_3 - 0,6x_2x_4 \\
 & + 2,0x_3 - 1,7x_3^2 + 0,7x_3x_4 \\
 & + 3,2x_4 - 1,2x_4^2
 \end{aligned} \tag{3}$$

За ЕС-моделями (2) і (3) побудовані показані на рис.2 однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів на ранню міцність досліджених бетонів в зонах екстремумів. Аналіз наведених діаграм показує, що бетони, модифіковані метакаоліном у кількості 20-25 кг/м<sup>3</sup> та з підвищеною до 0,9% кількістю добавки комплексної дії мають високу міцність у віці 3-х діб (рис.2.а) та 7-ми діб (рис.2.б). При цьому кількість поліпропіленової фібри несуттєво впливає на ранню міцність досліджених бетонів при стиску, тобто як на міцність у віці 3-х діб, так і на міцність у віці 7-ми діб.

Відсутність впливу кількості фібри на міцність бетону при стиску є досить відомим фактом, який встановлено у багатьох дослідженнях [10]. Метою застосування дисперсного армування в даній роботі, як описано вище, було покращення ряду інших показників якості, важливих для матеріалу дорожнього покриття. Відповідно на рис.3 наведені побудовані за ЕС-моделями (2) і (3) діаграми у вигляді кубів, які відображають вплив кількості портландцементу,

метакаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність досліджених бетонів у віці 3-х і 7-ми діб.

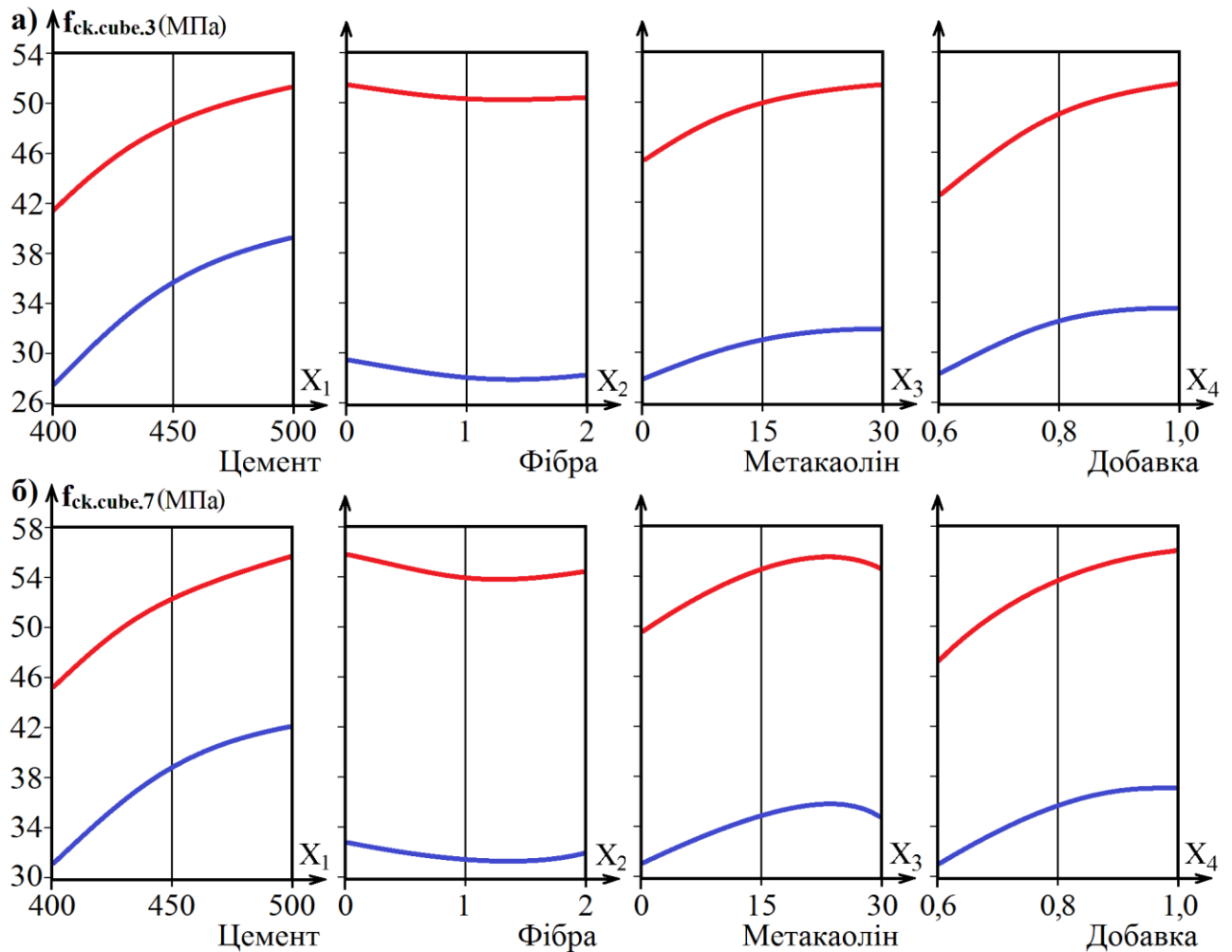


Рис.2. Вплив варійованих факторів складу на міцність при стиску досліджених бетонів в зонах екстремумів у віці 3-х діб (а) і у віці 7-ми діб (б)

Аналіз наведених на рис.3 діаграм показує, що при підвищенні кількості цементу у складі бетону його міцність очікувано зростає, але даний вплив є дещо нелінійним як у віці 3-х діб, так і у віці 7-ми діб. Тобто при підвищенні кількості в'язучого з 400 до 450 кг/м<sup>3</sup> міцність при стиску композитів зростає інтенсивніше, ніж при підвищенні кількості в'язучого з 450 до 500 кг/м<sup>3</sup>.

Метакаолін як активна мінеральна добавка сприяє підвищенню ранньої міцності бетонів. При цьому раціональною з позиції досягнення максимальної міцності у віці 3-х діб є кількість метакаоліну 30 кг/м<sup>3</sup>, а у віці 7-ми діб – 24..25 кг/м<sup>3</sup>.

При підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral рання міцність бетонів зростає, при цьому більш відчутно для бетонів з метаксаоліном.

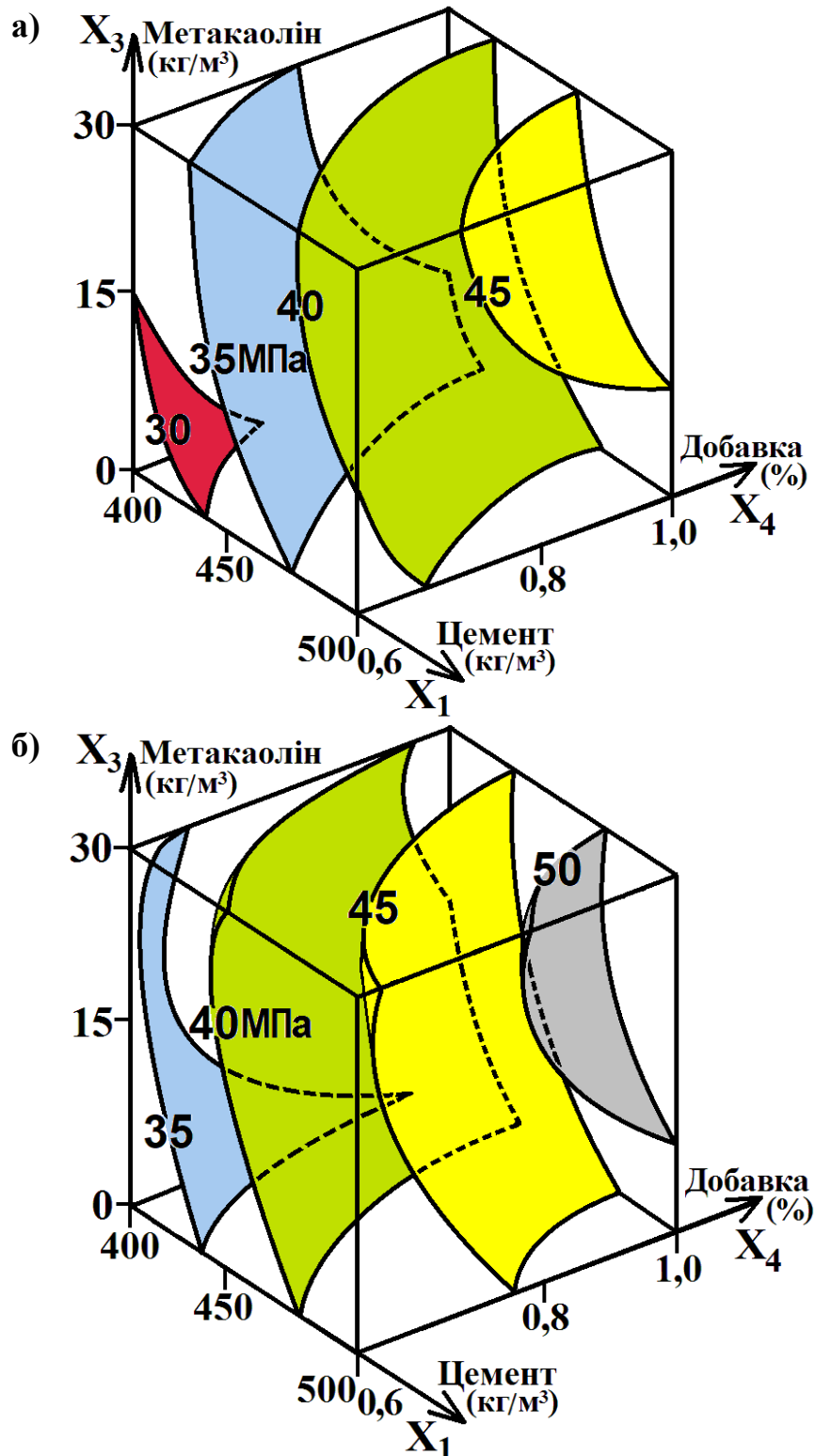


Рис.3. Вплив кількості портландцементу, метаксаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність досліджених бетонів у віці 3-х діб (а) і у віці 7-ми діб (б)

В цілому за рахунок використання раціональної кількості модифікаторів міцність досліджених бетонів у віці 3-х діб в залежності від кількості цементу у їх складі досягає 40-50 МПа, у віці 7-ми діб - від 45 до 55 МПа. Тобто за рахунок використання модифікаторів бетони мають підвищену ранню міцність, що дозволяє прискорювати терміни початку експлуатації дорожнього покриття.

Вплив варійованих факторів складу на міцність при стиску досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів у «стандартному» віці 28-х діб описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ck.cube}} \text{ (МПа)} = & 59,4 + 5,9x_1 - 2,4x_1^2 + 1,1x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 1,1x_1x_4 \\
 & - 2,0x_2 + 2,4x_2^2 \quad \pm 0x_2x_3 - 1,0x_2x_4 \\
 & + 1,6x_3 - 3,1x_3^2 \quad \pm 0x_3x_4 \\
 & + 1,5x_4 - 1,9x_4^2
 \end{aligned} \quad (4)$$

За ЕС-моделлю (4) побудовані показані на рис.4 однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів на міцність досліджених бетонів у віці 28 діб в зонах екстремумів. Аналіз наведених діаграми показує, що у віці 28 діб кількість фібри у складі бетону також несуттєво впливає на його міцність при стиску.

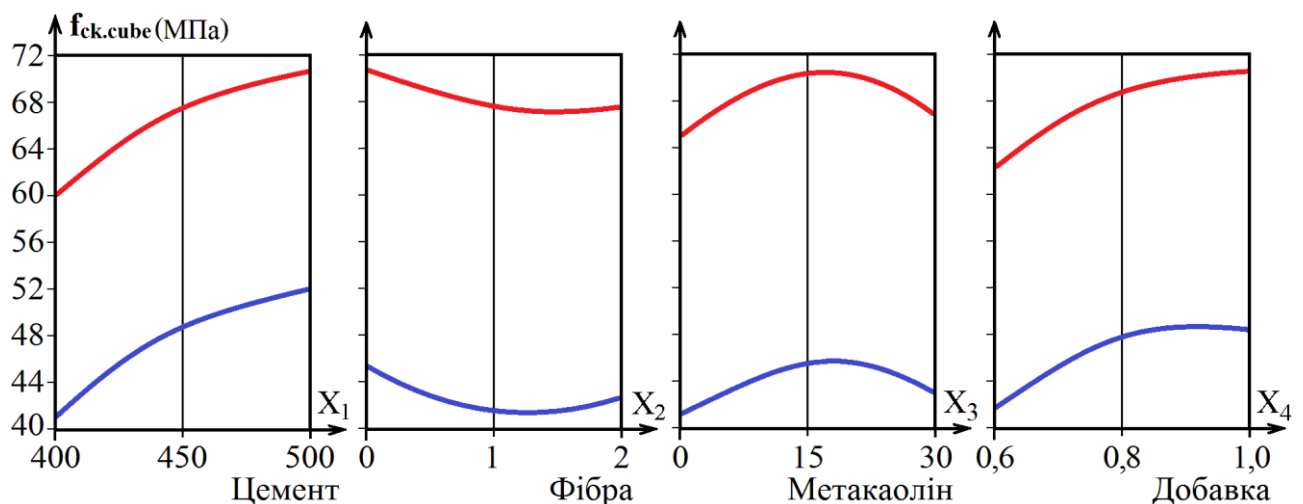


Рис.4. Вплив варійованих факторів складу на міцність при стиску досліджених бетонів у віці 28-ми діб в зонах екстремумів

Відповідно рис.5 наведена побудована за ЕС-моделлю (4) діаграма у вигляді куба, що відображає вплив кількості портландцементу, метаксаоліну і добавки Coral ExpertSuid-5 на міцність досліджених бетонів у віці 28 діб.

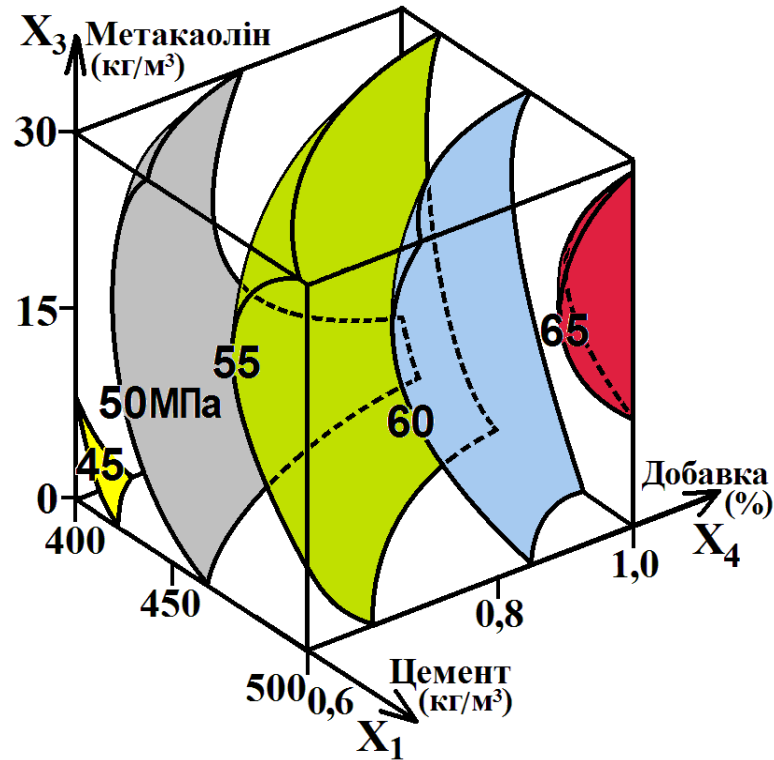


Рис.5. Вплив кількості портландцементу, метаксаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність досліджених бетонів у віці 28 діб

Аналіз діаграми на рис.5 показує, що позитивний вплив модифікаторів зберігається і у «стандартному» 28 денному віці. У даному віці більш раціональною з точки зору підвищення міцності при стиску є кількість метаксаоліну в діапазоні від 15 до 20  $\text{kg/m}^3$  та кількість добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 в діапазоні від 0,8 до 0,9 % від маси цементу.

### Міцність досліджених бетонів на розтяг при згині у різному віці

Для бетонів дорожніх покриттів міцність на розтяг при згині є більш важливим показником якості, ніж міцність при стиску. Визначені у натурному



експерименті значення міцності на розтяг при згині досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів у 18-ті точках експерименту у віці 3-х, 7-ми, і 28-ми діб наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Міцність на розтяг при згині досліджених бетонів  
жорстких дорожніх покриттів у різному віці

№	Міцність на розтяг при згині (МПа)		
	у віці 3-х діб, $f_{ctk.3}$	у віці 7-ми діб, $f_{ctk.7}$	у віці 28-ми діб, $f_{ctk}$
1	6,52	7,44	8,32
2	5,35	6,23	6,97
3	5,76	6,31	7,21
4	6,52	7,67	8,72
5	6,91	8,01	9,22
6	6,61	7,56	8,73
7	6,56	7,51	8,49
8	6,15	7,02	7,91
9	6,33	7,45	8,22
10	6,49	7,48	8,47
11	5,76	6,54	7,35
12	5,74	6,57	7,46
13	6,29	7,01	8,07
14	5,99	6,75	7,78
15	5,88	6,74	7,61
16	6,35	7,20	8,24
17	5,91	6,75	7,62
18	5,52	6,38	7,07



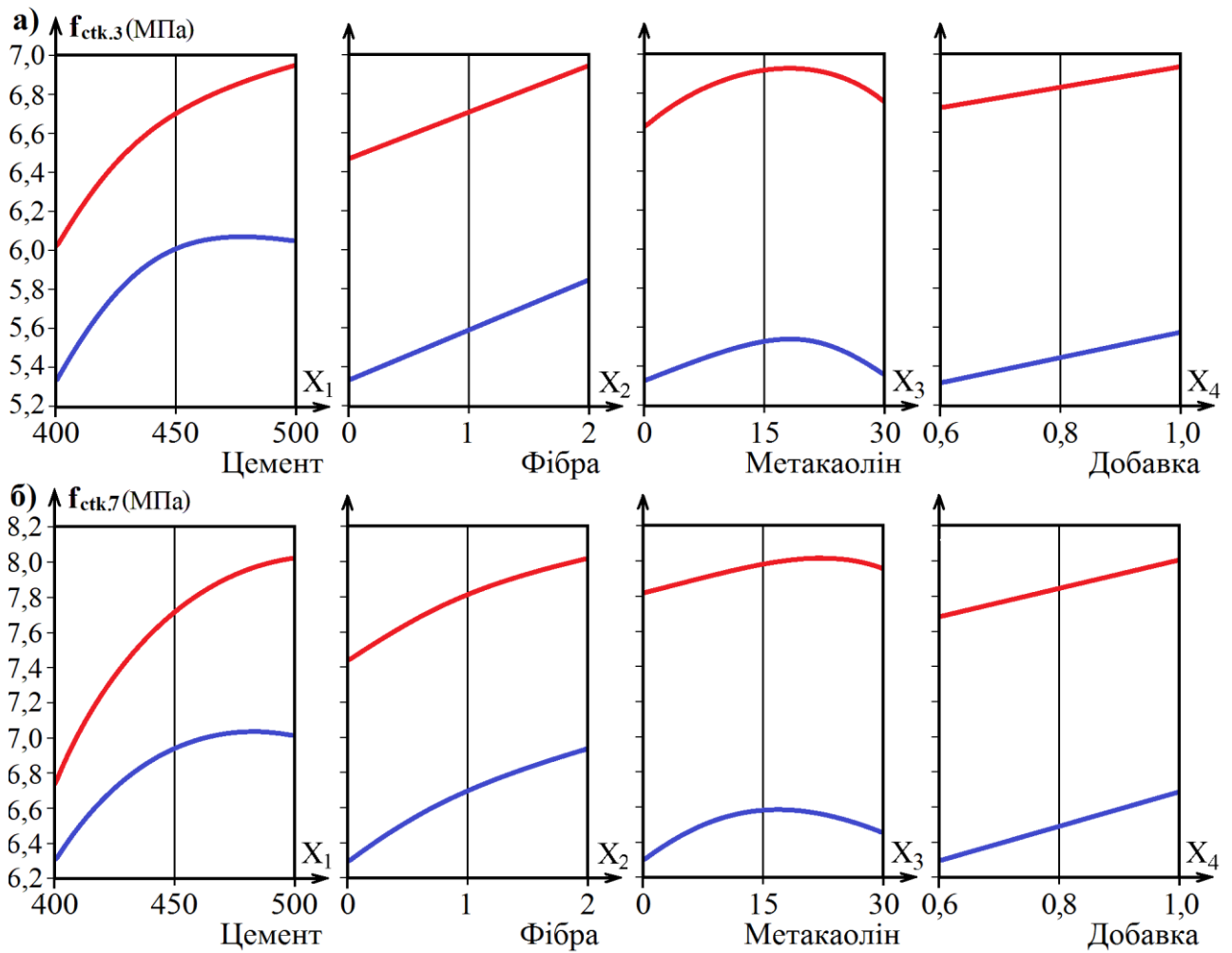


Рис.6. Вплив варійованих факторів складу на міцність досліджених бетонів на розтяг при згині в зонах екстремумів у віці 3-х діб (а) і у віці 7-ми діб (б)

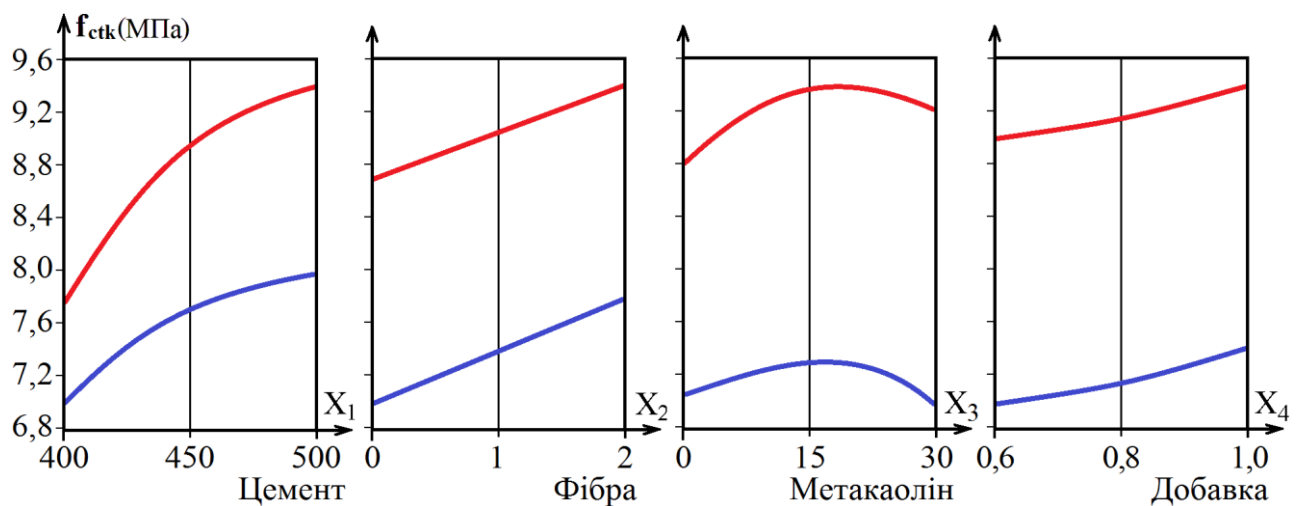


Рис.7. Вплив варійованих факторів складу на міцність досліджених бетонів на розтяг при згині у віці 28-ми діб в зонах екстремумів

Як видно з показаних на рис.6 і 7 діаграм, міцність модифікованих бетонів на розтяг при згині у віці 3-х діб складає 75..80% від міцності даних бетонів у «стандартному» 28-ми денному віці. Вплив кількості метакаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність бетонів на розтяг при згині є аналогічним впливу даних факторів на міцність бетонів при стиску. За рахунок дисперсного армування поліпропіленовою фіброю міцність бетонів дорожніх покриттів на розтяг підвищується на 0,5..0,8 МПа. В цілому дослідженні бетони при використанні раціональної кількості модифікаторів і фібри мають досить високу міцність на розтяг при згині – від 8 до 9,3 МПа в залежності від кількості цементу.

### **Морозостійкість бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів**

Значення морозостійкості досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

#### **Морозостійкість бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів**

№	Морозостійкість (цикли)	№	Морозостійкість (цикли)
1	400	10	400
2	250	11	250
3	300	12	300
4	350	13	350
5	450	14	300
6	400	15	300
7	300	16	400
8	300	17	300
9	350	18	250

За наведеними у таблиці 4 даними була побудована ЕС-модель, яка відображає вплив варійованих факторів складу на морозостійкість бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів:

$$\begin{aligned}
 F \text{ (цикли)} = & 393 + 60x_1 \pm 0x_1^2 + 8x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \\
 & + 23x_2 - 14x_2^2 - 10x_2x_3 \pm 0x_2x_4 \\
 & + 7x_3 - 29x_3^2 + 7x_3x_4 \\
 & + 19x_4 - 23x_4^2
 \end{aligned} \tag{8}$$

За ЕС-моделлю (8) побудовані показані на рис.8 однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів на морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів.

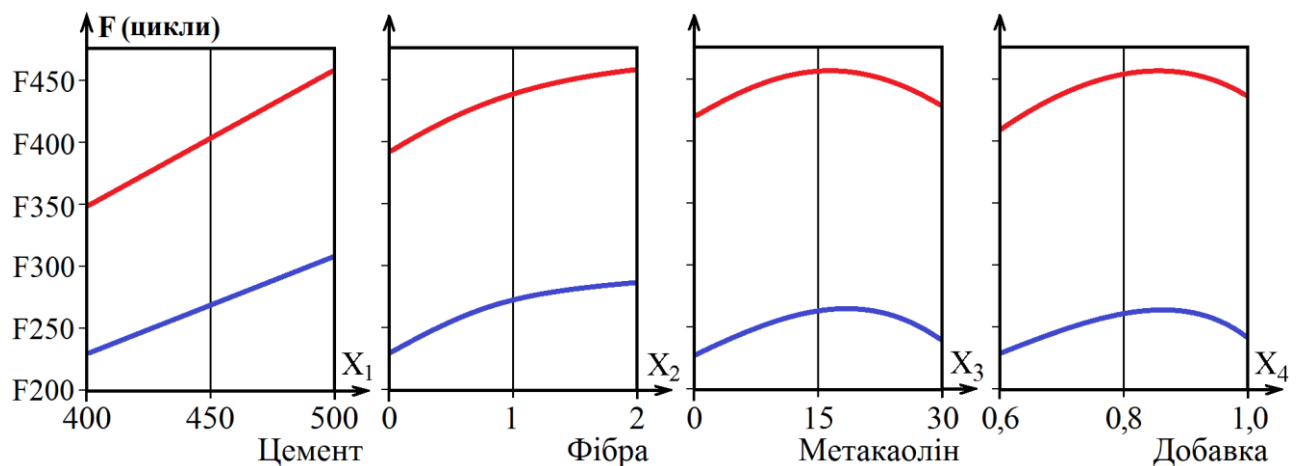


Рис.8. Вплив варійованих факторів складу на морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів

Аналіз діаграм показує, що завдяки застосуванню фібри морозостійкість бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів зростає на 50 циклів, що підвищує довговічність покриття

## Висновки

1. В/Ц досліджених бетонних сумішей рівної рухомості П2 залежало від складу бетону і варіювалося в діапазоні від 0,332 до 0,515. Введення поліпропіленової фібри і метакаоліну викликає необхідність підвищення В/Ц для збереження заданої рухомості суміші. Підвищення кількості добавки Coral ExpertSuid-5 з 0,6 до 0,8% відчутно знижує В/Ц суміші, зростання кількості даної добавки до 0,9..1% викликає подальше, але менш відчутне зниження В/Ц.

2. Бетони жорстких дорожніх покриттів при використанні раціональної кількості добавки комплексної дії полікарбонатного типу Coral ExpertSuid-5 (0,8..0,9% від маси цементу) і метакаоліну (15..20 кг/м<sup>3</sup>) мають високу міцність при стиску у ранньому віці (до 50 МПа і віці 3-х діб і до 55 МПа і віці 7-ми діб), а також міцність до 70 МПа у стандартному 28-ми денному віці.

3. За рахунок застосування поліпропіленової фібри у кількості до 2 кг/м<sup>3</sup> міцність бетонів дорожніх покриттів на розтяг при згині підвищується на 0,5..0,8 МПа. При цьому міцність модифікованих бетонів на розтяг при згині у віці 3-х діб складає 75..80% від міцності даних бетонів у 28-ми денному віці.

4. Завдяки застосуванню фібри морозостійкість бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів зростає на 50 циклів, що підвищує довговічність покриття.

5. Висока міцність і морозостійкість модифікованих бетонів і фібробетонів дозволяє використовувати їх в дорожніх покриттях доріг з найбільшим навантаження. Висока рання міцність даних бетонів дає можливість розпочинати експлуатацію доріг з цементобетонними покриттями у більш короткі терміни та полегшує виконання необхідних подальших технологічних операцій при будівництві доріг.

## Література

1. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Дорофєєв В.С., Мішутін А.В. Гідротехнічні та дорожні бетони. Одеса: Евен, 2012. 214 с.
2. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожних и аэродромных покрытий. М.: Транспорт, 1991. 152 с.
3. Толмачев С.Н. Строительство автодорог с цементобетонным покрытием в Украине – реальность сегодняшнего дня. Автошляховик України. 2013. № 4. С. 36-40.
4. Шевчук Г.Я., Собко Ю.М., Топилко Н.І. Шляхи підвищення довговічності цементобетонного дорожнього покриття. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", 2012, №737: Теорія і практика будівництва. С.231-233
5. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони. Л.Й. Дворкін, Є.М. Бабич, В.В. Житковський та ін. Рівне : НУВГП, 2017. 332 с.
6. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Модифицированные бетоны и фибробетоны для покрытий дорог и городских улиц. Сборник докладов международной юбилейной научно-технической конференции «Автомобильные дороги: безопасность и надежность». Часть 2. Минск: Белдорнии, 2018. С.141-147.
7. Мишутин А.В., Смолянец В.В., Кровяков С.А. Применение цементнобетонных покрытий для городских улиц и магистрали "Север-Юг". Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2013. Вип. 52. С. 176-182.
8. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К.: Вища школа, 1989. 327 с.
9. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2006. 116 с.