

ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ФІБРИ І СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРУ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНІВ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

¹**Кровяков С.О.**, д.т.н., доцент,
skrovyakov@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0800-0123

¹**Полторапавлов А.О.**,
andpolt90@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7044-4203

¹**Мішутін А.В.**, д.т.н., професор,
mishutin52@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9512-6084

¹**Заволока М.В.**, к.т.н., професор,
mvzavoloka@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2080-1230

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. За оптимальним планом було проведено експеримент, в якому варіювалися наступні фактори складу бетонів жорстких дорожніх покриттів: кількість портландцементу (від 350 до 450 кг/м³), кількість поліпропіленової фібри з довжиною волокон 39 мм та еквівалентним діаметром 0,45 мм (від 0 до 3 кг/м³), кількість суперпластифікатору на основі полікарбоксилатів (від 1 до 2%). Всі бетонні суміші мали рівну рухомість S1, що досягалося підбором кількості води у складі з відповідним корегуванням складу бетону. Встановлено, що при зростанні кількості портландцементу у складі бетону В/Ц сумішей рівної рухомості очікувано знижується. За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору з 1 до 2% від маси цементу В/Ц суміші знижується на 10-12%. При введенні поліпропіленової фібри у кількості до 1,5 кг/м³ В/Ц суміші практично не змінюється, але при підвищенні кількості фібри до 2,5-3 кг/м³ В/Ц відчутно зростає.

Міцність бетонів і фібробетонів визначалася у віці 3-х і 28-ми діб. Встановлено, що у віці 3-х діб міцність на стиск досліджених бетонів становить 63-69% від їх міцності у проектному віці. За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору до 2% міцність на стиск у віці 3-х діб зростає на 4,5-6 МПа, у віці 28-ми діб – на 7-9 МПа. У ранньому та у проектному віці при зростанні кількості поліпропіленової фібри до 1,5-1,8 кг/м³ міцність на стиск бетону підвищується в середньому на 3 МПа. Подальше підвищення кількості фібри вже негативно відображається на міцності бетону. У ранньому віці вплив кількості в'язучого на міцність на розтяг при згині бетонів є більш відчутним, ніж у проектному. За рахунок збільшення кількості портландцементу з 350 до 450 кг/м³ у віці 3-х діб міцність на розтяг при згині підвищується в середньому на 1,4 МПа, а у віці 28-ми діб – на 0,5 МПа. Найбільшу міцність на розтяг при згині мають бетони з кількістю суперпластифікатору 1,7-1,8%. Завдяки застосуванню дисперсного армування міцність на розтяг досліджених бетонів підвищується на 0,3-0,5 МПа. При застосуванні раціональної кількості добавки і фібри міцність на розтяг при згині досліджених бетонів складає не менш 6 МПа, що відповідає класу $B_{bt}4,8$. Згідно вимог ДБН В.2.3-4:2015 такі бетони можуть використовуватися для покриттів доріг будь якої категорії.

Ключові слова: жорстке покриття автомобільних доріг, модифікований фібробетон, поліпропіленова фібра, суперпластифікатор, міцність.

Вступ. Жорсткі цементобетонні покриття рік від року все більше використовуються при будівництві доріг у розвинутих країнах світу. В Україні частка доріг з цементобетонними покриттями в останні роки також зростає. Широке застосування жорстких дорожніх покриттів обумовлено їх суттєвими перевагами. Головна економічна перевага – це велика довговічність, яка забезпечує зниження експлуатаційних витрат. Цементобетон розподіляє навантаження на більшу площу земляного полотна в порівнянні з

більш «гнучким» асфальтобетоном. На цементобетонних дорогах не виникає колійності та хвилеподібних утворень. За рахунок меншого прогину дорожнього полотна економиться паливо, що є економічною і екологічною перевагою. Також екологічною перевагою цементобетонних покриттів є те, що вони не містять шкідливих нафтопродуктів, здатних проникати у ґрунт.

При цьому задача розробки ефективних бетонів дорожніх покриттів залишається актуальною. При її вирішенні важливим є забезпечення максимально можливого використання вітчизняних компонентів, як в'язучих, так і модифікаторів. При виготовленні фібробетонів, які показали свою ефективність в дорожньому будівництві, також слід надавати перевагу вітчизняним волокнам, номенклатура яких постійно розширюється. Спричинене бойовими діями руйнування дорожньої інфраструктури України додатково актуалізує задачу розробки ефективних дорожніх бетонів на основі вітчизняних компонентів.

Аналіз досліджень і публікацій. У США частка бетонних дорожніх та аеродромних покриттів становить близько 60%, у країнах західної Європи – від 10 до 40% [1]. Для влаштування найбільш навантажених транспортних розв'язок широко використовуються високоефективні дисперсно-армовані бетони [2-4]. Застосування фібри підвищує міцність на розтяг при згині бетону, що дозволяє зменшити товщину дорожньої плити, знижує усадочні деформації, підвищує зносостійкість і морозостійкість матеріалу [2, 5-7].

У якості дисперсної арматури використовуються волокна різних типів. При виготовленні бетонів дорожніх покриттів найбільш розповсюдженими є поліпропіленові, базальтові та сталеві волокна [6-8]. Поліпропіленові волокна є одними з найбільш ефективних з врахуванням їх вартості та корозійної стійкості в типових умовах експлуатації покриттів. Наприклад у [9] показано, що використання фібробетону з поліпропіленовою фіброю є економічно вигідним рішенням для доріг, яке забезпечує необхідну міцність та безпеку покриття. У [10] показано, що дисперсне армування поліпропіленовою фіброю дозволяє підвищити міцність і морозостійкість бетону дорожнього покриття фактично на тому ж рівні, що і використання металевої фібри. При цьому за рахунок меншої необхідної кількості фібри у складі бетону вартість дисперсного армування поліпропіленовою фіброю є меншою. У [11] показано, що поліпропіленові волокна дозволяють зменшувати ширину розкриття тріщин в покритті.

Слід відзначити, що раціональна кількість фібри суттєво розрізняється в залежності від геометричних розмірів волокон і особливостей складу бетону. У [12] максимальна міцність на стиск і на розтяг при згині бетону дорожнього покриття класу В35 була досягнута при введенні поліпропіленових волокон довжиною 12 і 20 мм у кількості 0,4%. При цьому фібра значно підвищувала стійкість бетону до багаторазового навантаження. У [7] встановлено, що раціональним з позиції забезпечення міцності та довговічності бетону дорожнього покриття є введення поліпропіленової фібри довжиною 12 мм у кількості 1,2-2,0 кг/м³. У [10] встановлено, що раціональною кількістю фібри довжиною 36 мм є 3 кг/м³. Тобто для кожного виду волокон слід визначати їх раціональну кількість з врахуванням особливостей бетонної суміші та економічної доцільності.

Також слід відзначити, що якість роботи дисперсного волокна в бетоні суттєво залежить від його зчеплення з матрицею. На таке зчеплення впливає не лише тип поверхні волокон, а і міцність бетону та особливості розподілу заповнювача [13, 14]. Відповідно в залежності від рухомості суміші та особливостей її складу необхідно корегувати кількість дисперсної арматури для підвищення її ефективності.

Пластифікуючі добавки на сьогодні є фактично обов'язковим компонентом бетонних сумішей, але при застосуванні дисперсного армування раціональна кількість модифікатору може відрізнятись від його раціональної кількості для неармованого бетону. Тобто кількість модифікаторів також має коректуватися в залежності від типу дисперсного армування та інших особливостей складу бетону [7, 15, 16].

Відповідно задача розробки ефективних фібробетонів дорожніх покриттів має вирішуватися з врахуванням викладених вище особливостей та наявної сировинної бази.

Метою роботи є визначення впливу кількості поліпропіленової фібри і

суперпластифікатору на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів в ранньому і проектному віці.

Матеріали і методи досліджень. В дослідженнях властивостей бетонів і фібробетонів використовувалися перелічені нижче матеріали:

- портландцемент ПЦ II/A-K(III-B)-500P виробництва ТОВ «Цемент» (м. Одеса);
- кварцовий пісок Микитівського кар'єру (Миколаївська область) з модулем крупності 2,59, митий;
- гранітний щебінь фракції 5-20 мм;
- добавка суперпластифікатор на основі полікарбоксилатів STACHEMENT 2570/5/G виробництва ТОВ «Стахема Львів-сервіс» (м. Львів);
- поліпропіленова фібра «X Mesh» з довжиною волокон 39 мм та еквівалентним діаметром 0,45 мм виробництва ТОВ «ДІФ» (м. Дніпро).

Дослідження проводилися за оптимальним 15-ти точковим 3-х факторним планом [17, 18]. При проведенні експерименту варіювалися наступні фактори складу бетону:

- X_1 , кількість портландцементу, від 350 до 450 кг/м³;
- X_2 , кількість поліпропіленової фібри, від 0 до 3 кг/м³;
- X_3 , кількість добавки суперпластифікатору, від 1 до 2% від маси цементу.

План експерименту і склади досліджених бетонів і фібробетонів наведені у таблиці 1.

Всі суміші мали рівну рухомість S_1 , значення осадки конусу складало від 2 до 3 см, що досягалося підбором кількості води у складі з відповідним корегуванням складу бетону. Така рухомість була обрана як типова для бетонів дорожніх покриттів при їх укладанні з застосуванням бетоно-укладальника з ковзаючою опалубкою.

Бетонні зразки кубу розміром 10×10×10 см і призми розміром 10×10×40 см виготовляли згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Визначення міцності бетонів на стиск і міцності на розтяг при згині проводилося у віці 3 і 28 діб згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009.

Таблиця 1 – План експерименту і склади досліджених бетонів і фібробетонів

№ точки	Рівні факторів			Склад бетону (кг/м ³)					
	X_1 портландцемент	X_2 фібра	X_3 добавка	Портландцемент	Щебінь	Пісок	Фібра	Добавка	Вода
1	-1	-1	-1	350	1270	680	0	3,50	157
2	-1	-1	1	350	1270	700	0	7,00	145
3	-1	0	0	350	1270	690	1,5	5,25	148
4	-1	1	-1	350	1270	675	3	3,50	162
5	-1	1	1	350	1270	695	3	7,00	143
6	0	-1	0	400	1250	640	0	6,00	148
7	0	0	-1	400	1250	635	1,5	4,00	161
8	0	0	0	400	1250	640	1,5	6,00	151
9	0	0	1	400	1250	645	1,5	8,00	145
10	0	1	0	400	1250	635	3	6,00	167
11	1	-1	-1	450	1230	585	0	4,50	165
12	1	-1	1	450	1230	600	0	9,00	145
13	1	0	0	450	1230	585	1,5	6,75	151
14	1	1	-1	450	1230	580	3	4,50	171
15	1	1	1	450	1230	590	3	9,00	155

Результати досліджень. Суміші всіх досліджених бетонів і фібробетонів мали рівну рухомість S1, відповідно їх В/Ц залежало від складу. Експериментально-статистична (ЕС) модель [17-19], що описує вплив варійованих факторів на В/Ц суміші має вигляд:

$$\begin{aligned} \text{В/Ц} = & 0,380 - 0,040x_1 \pm 0x_1^2 + 0,003x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\ & + 0,009x_2 + 0,013x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\ & - 0,021x_3 \pm 0x_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Поле даної ЕС-моделі [19] має мінімальне значення $\text{В/Ц}_{\min} = 0,316$ у точці з координатами $x_1 = x_3 = 1$, $x_2 = -0,74$ і максимальне значення $\text{В/Ц}_{\max} = 0,461$ у точці з координатами $x_1 = x_3 = -1$, $x_2 = 1$. Тобто найменше В/Ц прогнозовано мають бетонні суміші з максимальною кількістю портландцементу (450 кг/м^3) і суперпластифікатору (2%) та практично без фібри. Найбільше В/Ц фіксується для суміші з мінімальною кількістю портландцементу (350 кг/м^3) і суперпластифікатору (1%) та максимальною кількістю фібри (3 кг/м^3).

За ЕС-моделлю (1) була побудована діаграма у формі куба, яка показана на рис. 1.

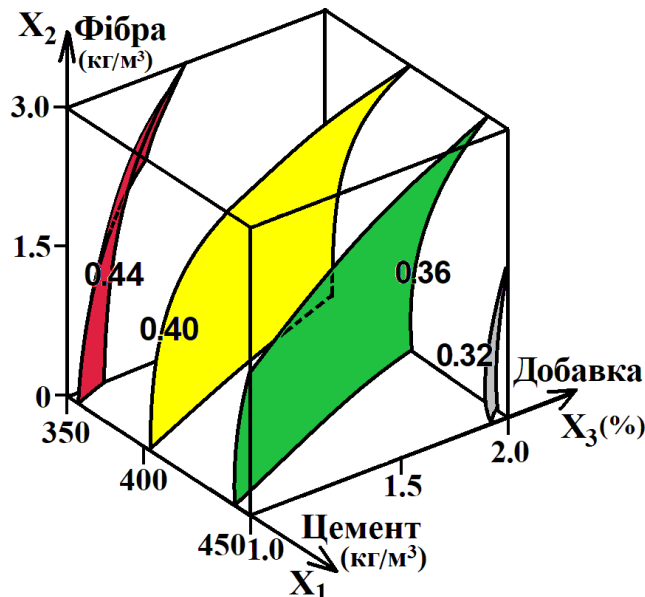


Рис. 1. Вплив варійованих факторів складу на В/Ц бетонної суміші рівної рухомості

Аналіз ЕС-моделі (1) і діаграми на рис. 1 показує, що при зростанні кількості портландцементу у складі бетону В/Ц бетонної суміші рівної рухомості очікувано знижується. За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору з 1 до 2% від маси цементу В/Ц суміші знижується на 10-12%. При введенні поліпропіленової фібри у кількості до $1,5 \text{ кг/м}^3$ В/Ц суміші практично не змінюється. Тобто використання такої кількості волокна майже не потребує додаткового введення води для збереження рівної рухомості суміші. Але при підвищенні кількості фібри до $2,5-3 \text{ кг/м}^3$ В/Ц суміші зростає на 5-6%, що еквівалентно зростанню кількості води у складі бетону на $8-10 \text{ л/м}^3$.

Міцність бетонів на стиск і на розтяг при згині бетонів визначалася в ранньому і проектному віці. ЕС-моделі, що відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів у віці відповідно 3-х і 28 діб мають вигляд:

$$\begin{aligned} f_{\text{cm},3} \text{ (МПа)} = & 47,84 + 2,49x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0x_1x_2 - 1,28x_1x_3 \\ & \pm 0x_2 - 2,80x_2^2 - 1,13x_2x_3 \\ & + 2,80x_3 \pm 0x_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 f_{cm} \text{ (МПа)} = & 73,04 + 6,53x_1 - 1,43x_1^2 + 0,76x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & + 0,95x_2 - 2,03x_2^2 - 1,04x_2x_3 \\
 & + 4,39x_3 - 2,53x_3^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

Поля [19] ЕС-моделей (2) і (3) мають мінімальні значення $f_{cm.3.min} = 37,31$ МПа і $f_{cm.min} = 54,91$ МПа у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = -1$. Тобто як у віці 3-х діб, так і у віці 28-ми діб найменшу міцність на стиск має бетон з мінімальною кількістю портландцементу, без фібри і з мінімальною кількістю суперпластифікатору. Максимальне значення міцності у віці 3-х діб $f_{cm.3.max} = 51,97$ МПа має склад у точці з координатами $x_1 = x_3 = 1$, $x_2 = -0,09$. У віці 28-ми діб максимальне значення міцності $f_{cm.max} = 80,14$ МПа має склад у точці з координатами $x_1 = x_3 = 1$, $x_2 = 0,21$. Тобто найбільшу міцність при стиску у ранньому та проектному віці мають склади фібробетонів з максимальною кількістю портландцементу і суперпластифікатору та з кількістю дисперсної арматури, близькою до середини діапазону варіювання, тобто приблизно $1,5 \text{ кг/м}^3$.

Побудовані за ЕС-моделями (2) і (3) діаграми показані на рис. 2.

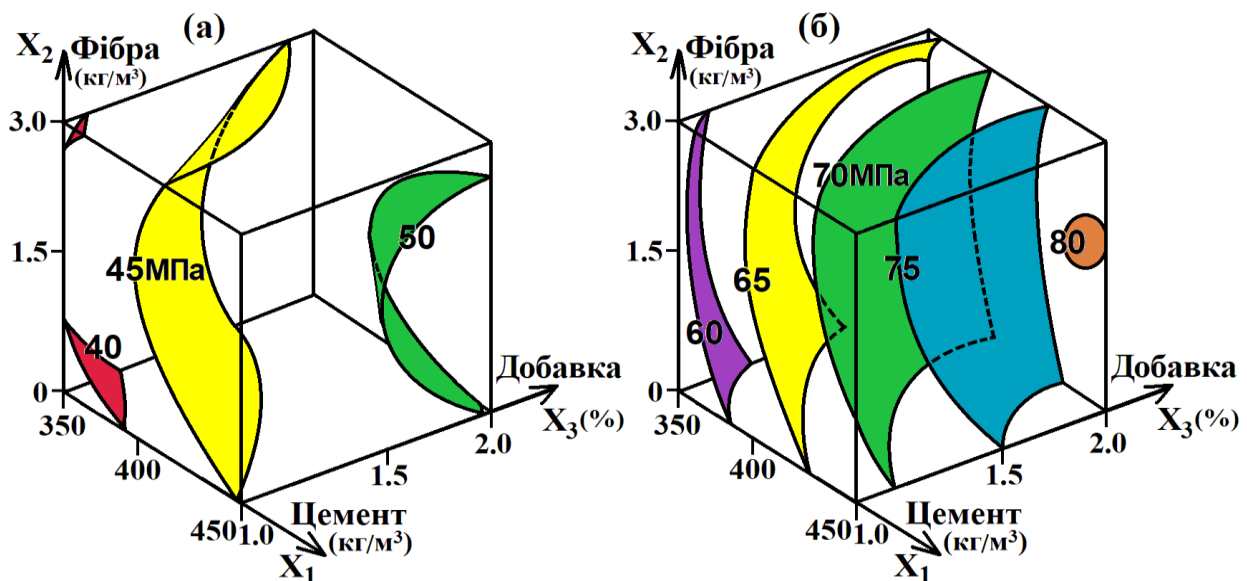


Рис. 2. Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів: а – у віці 3-х діб, б – у віці 28-ми діб

Як видно з діаграм на рис. 2, вже у віці 3-х діб міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів становить 63-69% від їх міцності у проектному віці. Це досягається насамперед завдяки застосуванню портландцементу ПЦ II/A-K(III-B)-500P, тобто з підвищеною ранньою міцністю, а також ефективного суперпластифікатору полікарбоксилатного типу. По мірі зростання кількості портландцементу у складі бетонів їх міцність прогнозовано збільшується, при цьому при підвищенні кількості в'язучого з 350 до 400 кг/м^3 міцність зростає більш відчутно, ніж за рахунок подальшого підвищення кількості в'язучого з 400 до 450 кг/м^3 .

За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G з 1 до 2% від маси портландцементу міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 3-х діб зростає на 4,5-6 МПа, у віці 28-ми діб – на 7-9 МПа. Це є результатом суттєвого зниження В/Ц суміші при застосуванні даного модифікатору. При цьому у діапазоні варіювання кількості суперпластифікатору від 1,6 до 2% міцність бетонів змінюється неістотно і є близькою до максимальної, тобто таку кількість модифікатору можна вважати раціональною.

У ранньому та у проектному віці по мірі зростання у складі бетону кількості поліпропіленової фібри до $1,5-1,8 \text{ кг/м}^3$ його міцність на стиск підвищується в середньому на 3 МПа. Подальше підвищення кількості фібри вже негативно відображається на міцності бетону, що можна пояснити впливом дисперсного армування на В/Ц суміші.

В цілому модифіковані фібробетони при раціональній кількості суперпластифікатору і дисперсної арматури у проектному віці мають міцність від 65 до 80 МПа в залежності від кількості портландцементу. Вже у віці 3-х діб модифіковані фібробетони раціональних складів мають міцність на стиск від 45 до 54 МПа, що спрощує виконання подальших технологічних процесів при будівництві автодоріг і у разі необхідності дозволяє прискорити відкриття руху транспорту по ділянці дороги, що будується.

Конструкції жорстких дорожніх покриттів працюють в умовах різноспрямованих навантажень від дії транспорту, що рухається. Відповідно для бетонів дорожніх покриттів важливим показником якості є міцність на розтяг при згині. Характеристика міцності бетону на розтяг приймається як одна з основних при розрахунку конструкції доріг з жорстким покриттям [2, 20]. ЕС-моделі, що відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів у віці 3-х і 28-ми діб мають вигляд:

$$f_{c.tf.3} \text{ (МПа)} = 5,28 + 0,71x_1 \pm 0x_1^2 + 0,16x_1x_2 + 0,15x_1x_3 + 0,16x_2 \pm 0x_2^2 - 0,15x_2x_3 + 0,46x_3 - 0,33x_3^2 \quad (4)$$

$$f_{c.tf} \text{ (МПа)} = 6,48 + 0,23x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0x_1x_2 - 0,14x_1x_3 + 0,07x_2 - 0,22x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 0,30x_3 - 0,23x_3^2 \quad (5)$$

Для даних ЕС-моделей поля властивостей мають мінімальні значення $f_{c.tf.3.min} = 3,80$ МПа і $f_{c.tf.min} = 5,31$ МПа у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = -1$. Тобто найменшу міцність на розтяг при згині має бетон з мінімальною кількістю портландцементу, без фібри і з мінімальною кількістю суперпластифікатору, що аналогічно складу, який характеризується найменшою міцністю на стиск. Максимальне значення міцності на розтяг при згині у віці 3-х діб $f_{c.tf.3.max} = 6,41$ МПа має склад у точці з координатами $x_1 = x_2 = 1, x_3 = 0,71$, тобто при максимальній кількості портландцементу і фібри та з кількістю суперпластифікатору приблизно 1,8%. У віці 28-ми діб максимальне значення міцності на розтяг при згині $f_{c.tf.max} = 6,74$ МПа має склад бетону у точці з координатами $x_1 = 1, x_2 = 0,16, x_3 = 0,36$, тобто при максимальній кількості портландцементу, з кількістю фібри приблизно 1,8 кг/м³ та суперпластифікатору приблизно 1,7%.

Побудовані за ЕС-моделями (4) і (5) діаграми показані на рис. 3.

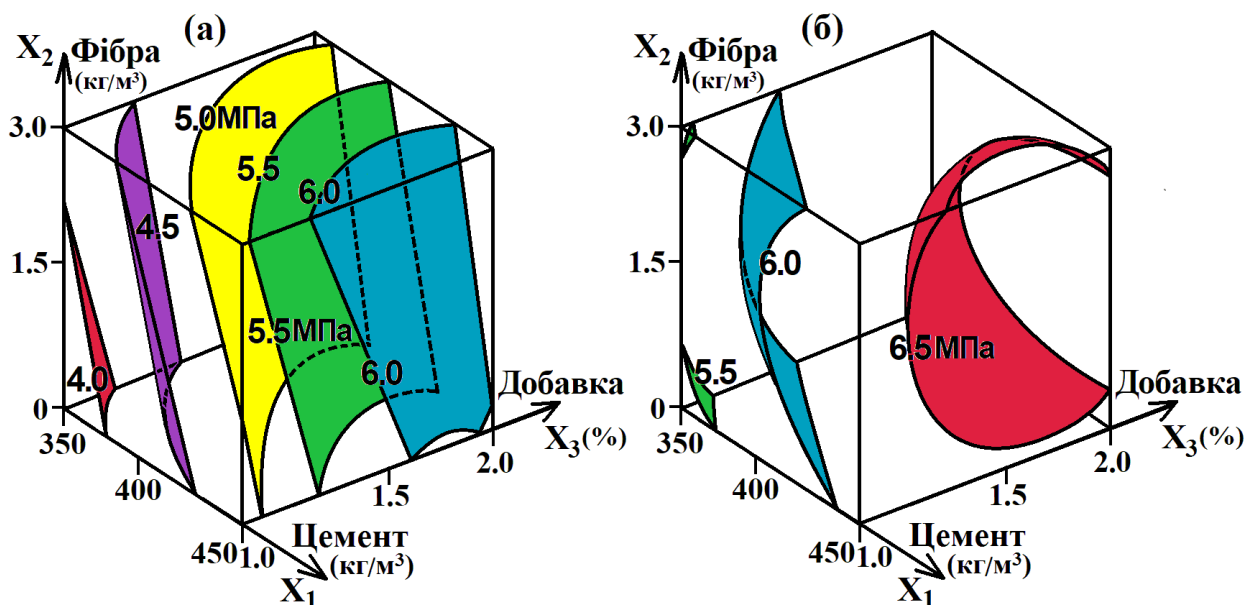


Рис. 3. Вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів: а – у віці 3-х діб, б – у віці 28-ми діб

Як видно з показаних на рис. 3 діаграм, по мірі зростання кількості портландцементу міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів очікувано підвищується. У ранньому віці вплив кількості в'язучого на величину $f_{c,tf}$ є більш відчутним, ніж у проєктному віці. За рахунок збільшення кількості портландцементу з 350 до 450 кг/м³ у віці 3-х діб міцність на розтяг при згині бетону підвищується в середньому 1,4 МПа, а у віці 28м діб – на 0,5 МПа. Це може бути пояснено зменшенням впливу міцності самої цементно-піщаної матриці на опір напруженням, що виникають при розтягуванні, у порівнянні з впливом її адгезії до крупного заповнювача при зростанні віку композиту.

Незалежно від віку найбільшу міцність на розтяг при згині мають бетони з кількістю суперпластифікатору 1,7-1,8% від маси цементу, що майже співпадає з діапазоном кількості добавки, який забезпечував найбільшу міцність при стиску. Завдяки застосуванню дисперсного армування міцність на розтяг при згині досліджених бетонів підвищується на 0,3-0,5 МПа. У ранньому віці більша ефективність простежується при застосуванні максимальної кількості фібри, а у проєктному віці – при кількості 1,5-1,8 кг/м³, що аналогічно діапазону, який забезпечував також найбільші показники щодо міцності на стиск. Такий ефект від зміни кількості фібри у складі можна пояснити її впливом на В/Ц суміші, що описано вище. Слід відмітити, що фібра використовувалася в даних бетонах не лише для покращення їх міцності, а і довговічності [7].

В цілому при застосуванні раціональної кількості добавки і фібри міцність на розтяг при згині досліджених бетонів складає не менш 6 МПа, що відповідає класу $B_{btb}4,8$. Згідно вимог ДБН В.2.3-4:2015 [20] такі бетони можуть використовуватися для жорстких дорожніх покриттів доріг будь якої категорії.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведені з використанням методів оптимального планування експерименту дослідження дозволили визначити вплив кількості добавки суперпластифікатору на основі полікарбонатів і поліпропіленової фібри на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів. Встановлено, що раціональним з точки зору досягнення більшої міцності як у віці 3-х, так і 28-ми діб є використання добавки STACHEMENT 2570/5/G у кількості 1,7-1,8% від маси цементу та поліпропіленової фібри «X Mesh» з довжиною волокон 39 мм у кількості 1,5-1,8 кг/м³. Навіть при мінімальній кількості цементу у складі міцність таких бетонів на стиск складає не менш 65 МПа, на розтяг при згині – не менш 6,0 МПа, що дозволяє використовувати їх для жорстких дорожніх покриттів доріг усіх категорій, включаючи першу. При будівництві найбільш завантажених ділянок доріг можна використовувати модифіковані фібробетони з підвищеною до 400-450 кг/м³ кількістю цементу у складі, що забезпечить більшу конструктивну надійність покриття.

У подальшому передбачено дослідження впливу кількості суперпластифікатору і поліпропіленової фібри на довговічність бетонів жорстких дорожніх покриттів, яка в типових умовах експлуатації автомобільних доріг України обумовлюється насамперед морозостійкістю і зносостійкістю бетону.

Література

1. K. Hall, D. Dawood, S. Vanikar and other. Long-life Concrete Pavements in Europe and Canada. Report No. FHWA-PL-07-027, American Trade Initiatives, 2007. 69 p.
2. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M.S., Raza S.S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials*. 2020. 13. e00429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
3. Jaral M., Firdous E.S. A review study on the steel fiber reinforced concrete pavement. *International journal of scientific development and research*. 2018. 3 (4). pp. 311-313.
4. Hamim O.F., Aninda S.S., Hoque M.S., Hadiuzzaman M. Suitability of pavement type for developing countries from an economic perspective using life cycle cost analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2021. 14. 259–266. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0107-z>.

5. Affan M., Ali M. Experimental investigation on mechanical properties of jute fiber reinforced concrete under freeze-thaw conditions for pavement applications. *Construction and Building Materials*. 2022. 323. 126599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126599>.
6. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskiy V., Grynyova I. Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair. *Applied Sciences*. 2022. 12 (3). 1174. <https://doi.org/10.3390/app12031174>.
7. Kroviakov S., Mishutin A., Chintea L. Multi-criteria optimization of the fiber concretes compositions of rigid pavement. *Mechanics and mathematical methods*, 2021, 3 (1). pp. 62-71. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2021-3-1-62-71>.
8. Sarkar A., Hajihosseini M. The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2018. 21 (6). pp. 1726-1737. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379>.
9. Nobili A., Lanzoni L., Tarantino A.M. Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement. *Construction and Building Materials*. 2013. 47. pp. 888-895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.077>.
10. Kroviakov S.O., Hedulian D.Iu., Kryzhanovskiy V.O., Zaboloka M.V., Yelkin A.V. Comparison of fiber concrete properties for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fiber. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2022. №87. С.76-84. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-76-84>.
11. Alsabbagh A., Wtaife S., Shaban A., Suksawang N., Alshammari E. Enhancement of rigid pavement capacity using synthetic discrete fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 584. 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012033>.
12. Santhosh J.C., Samal S.R., Ganesh V.N., Pavani D., Sridhar R.S. Experimental investigation on the effect of polypropylene fibers with respect to the fatigue behavior of rigid pavement. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. 207. pp. 383-395. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7509-6_31.
13. Kopecky L., Machovic V., Králík V., Bittnar Z., Andertová J., Šmilauer V., Lhotka M. Surface modification of pet fibers to improve mechanical properties of cement composites. *33rd International Conference on Cement Microscopy*, 2011, pp.355-371.
14. Kroviakov S., Kryzhanovskiy V., Zaboloka M. Steel fibrous concrete with high-early strength for rigid pavements repair. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1162. no. 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012008>.
15. Aruntaş H. Y., Cemalgil S., Şimşek O., Durmuş G., Erdal M. Effects of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber. *Materials Letters*. 2008. 62 (19). pp. 3441-3443. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.02.064>.
16. Ahmad W., Farooq S.H., Usman M., Khan M., Ahmad A., Aslam F., Yousef R.A., Abduljabbar H.A., Sufian M. Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete. *Materials*. 2020. 13. 1075. <https://doi.org/10.3390/ma13051075>.
17. Jeff Wu C. F., Hamada M.S. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization* (2d ed.), 2009, 760 p.
18. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin A. Modelling the relations of rheological characteristics with composition of plaster mortar. *Materials*. 2022. 15(1). 371. <https://doi.org/10.3390/ma15010371>.
19. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.
20. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 113 с.

References

- [1] K. Hall, D. Dawood, S. Vanikar and other, Long-life Concrete Pavements in Europe and Canada. Report No. FHWA-PL-07-027, American Trade Initiatives, 2007.
- [2] I. Hussain, B. Ali, T. Akhtar, M.S. Jameel, S.S. Raza, "Comparison of mechanical

- properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene)", *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00429, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
- [3] M. Jaral, E.S. Firdous, "A review study on the steel fiber reinforced concrete pavement", *International journal of scientific development and research*, 3 (4), pp. 311-313, 2018.
- [4] O.F. Hamim, S.S. Aninda, M.S. Hoque, "Hadiuzzaman M. Suitability of pavement type for developing countries from an economic perspective using life cycle cost analysis", *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14, pp. 259–266, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0107-z>.
- [5] M. Affan, M. Ali, "Experimental investigation on mechanical properties of jute fiber reinforced concrete under freeze-thaw conditions for pavement applications", *Construction and Building Materials*, 323, 126599, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126599>.
- [6] Ž. Kos, S. Kroviakov, V. Kryzhanovskiy, I. Grynyova, "Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair", *Applied Sciences*, 12 (3), 1174, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12031174>.
- [7] S. Kroviakov, A. Mishutin, L. Chintea, "Multi-criteria optimization of the fiber concretes compositions of rigid pavement", *Mechanics and mathematical methods*, 3 (1), pp. 62-71, 2021. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2021-3-1-62-71>.
- [8] A. Sarkar, M. Hajihosseini, "The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement", *Road Materials and Pavement Design*, 21 (6), pp. 1726-1737, 2018. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379>.
- [9] A. Nobili, L. Lanzoni, A.M. Tarantino, "Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement", *Construction and Building Materials*, 47, pp. 888-895, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.077>.
- [10] S.O. Kroviakov, D.Iu. Hedulian, V.O. Kryzhanovskiy, M.V. Zavoloka, A.V. Yelkin, "Comparison of fiber concrete properties for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fiber", *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no.87, pp.76-84, 2022. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-76-84>.
- [11] A. Alsabbagh, S. Wtaife, A. Shaban, N. Suksawang, E. Alshammari, "Enhancement of rigid pavement capacity using synthetic discrete fibers", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 584, 012033, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012033>.
- [12] J.C. Santhosh, S.R. Samal, V.N. Ganesh, D. Pavani, R.S. Sridhar, "Experimental investigation on the effect of polypropylene fibers with respect to the fatigue behavior of rigid pavement", *Lecture Notes in Civil Engineering*, 207, pp. 383-395, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7509-6_31.
- [13] L. Kopecky, V. Machovic, V. Králík, Z. Bittnar, J. Andertová, V. Šmilauer, M. Lhotka, "Surface modification of pet fibers to improve mechanical properties of cement composites", *33rd International Conference on Cement Microscopy*, 2011, pp.355-371.
- [14] S. Kroviakov, V. Kryzhanovskiy, M. Zavoloka, "Steel fibrous concrete with high-early strength for rigid pavements repair", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1162, no. 012008, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012008>.
- [15] H.Y. Aruntaş, S. Cemalgil, O. Şimşek, G. Durmuş, M. Erdal, "Effects of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber", *Materials Letters*, 62 (19), pp. 3441-3443, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.02.064>.
- [16] W. Ahmad, S.H. Farooq, M. Usman, M. Khan, A. Ahmad, F. Aslam, R.A. Yousef, H.A. Abduljabbar, M. Sufian, "Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete", *Materials*, 13, 1075, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13051075>.
- [17] C.F. Jeff Wu, M.S. Hamada, *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization* (2d ed.), 2009.
- [18] K. Moskalova, T. Lyashenko, A. Aniskin, "Modelling the relations of rheological

characteristics with composition of plaster mortar", *Materials*, 15(1), 371, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15010371>.

- [19] T.V. Lyashenko, V.A. Voznesenskiy, *Metodologiya retsepturno-tehnologicheskikh poley v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii*. Odessa: Astroprint, 2017.
- [20] DBN V.2.3-4:2015. Avtomobil'ni dorohy. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo. Kyiv, 2015.

THE INFLUENCE OF THE AMOUNT OF FIBER AND SUPERPLASTICIZER ON THE STRENGTH OF CONCRETE FOR THE RIGID PAVEMENTS

¹**Kroviakov S.O.**, Doctor of Engineering, Assistant Professor, skrovyakov@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0800-0123

¹**Poltorapavlov A.O.**, andpolt90@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7044-4203

¹**Mishutin A.V.**, Doctor of Engineering, Professor, mishutin52@ukr.net, ORCID 0000-0001-9512-6084

¹**Zavoloka M.V.**, PhD, Professor, mvzavoloka@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2080-1230

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrichson street, Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. According to the optimal plan, an experiment was conducted in which the following factors of the concrete composition of rigid pavements were varied: the amount of Portland cement (from 350 to 450 kg/m³), the amount of polypropylene fiber with a fiber length of 39 mm and an equivalent diameter of 0.45 mm (from 0 to 3 kg/m³), the amount of superplasticizer based on polycarboxylates (from 1 to 2%). All concrete mixtures had equal mobility S1. Equal mobility was achieved by selecting the amount of water in the composition with appropriate adjustment of the concrete composition. It was established that with an increase in the amount of Portland cement in the concrete composition, the W/C of mixtures of equal mobility decrease. By increasing the amount of superplasticizer from 1 to 2% of the weight of cement, the W/C of the mixture decreases by 10-12%. When polypropylene fiber is introduced in the amount of up to 1.5 kg/m³, the W/C of the mixture practically does not change. But when the amount of fiber is increased to 2.5-3 kg/m³, the W/C of the mixture significantly increases.

The strength of concrete and fiber concrete was determined at the age of 3 and 28 days. It was established that at the age of 3 days, the compressive strength of the tested concretes is 63-69% of its strength at the design age. By increasing the amount of superplasticizer to 2%, the compressive strength increases by 4.5-6 MPa at the age of 3 days, and increases by 7-9 MPa at the age of 28 days. In the early and design age, when the amount of polypropylene fiber increases to 1.5-1.8 kg/m³, the compressive strength of concrete increases by an average of 3 MPa. A further increase in the amount of fiber already has a negative effect on the strength of concrete. At an early age, the influence of the amount of cement on the flexural strength of concrete is more noticeable than at the design age. Due to the increase in the amount of Portland cement from 350 to 450 kg/m³ at the age of 3 days, the flexural strength increases by an average of 1.4 MPa, and at the age of 28 days it increases by 0.5 MPa. Concretes with amount of superplasticizer 1.7-1.8% have the highest flexural strength. Thanks to the application of dispersed reinforcement, the tensile strength of the tested concretes increases by 0.3-0.5 MPa. When using a rational amount of additives and fiber, the flexural strength of the tested concretes is at least 6 MPa, which corresponds to the class B_{bb}4.8. According to the requirements of DBN B.2.3-4:2015, such concrete can be used for rigid pavements of any category.

Keywords: rigid pavement, modified fiber concrete, polypropylene fiber, superplasticizer, strength.

Стаття надійшла до редакції 9.12.2022