

УДК 691.32

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ СКЛАДІВ ФІБРОБЕТОНІВ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО- СТАТИСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Кровяков С. О.¹, Ігнатенко А. В.¹, Шестакова Л. Є.¹, Заволока М. В.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація: За 15-ти точковим планом проведений експеримент, в якому варіювалися наступні 3 фактори складу фібробетонів жорсткого дорожнього покриття: кількість портландцементу від 290 до 350 кг/м³, кількість базальтової фібри від 0,9 до 1,5 кг/м³, кількість суперпластифікатора від 0,6 до 1% від маси цементу. Отримано комплекс експериментально-статистичних моделей, які описують вплив факторів на міцність на стиск, міцність на розтяг при згині, морозостійкість, стиранисть і собівартість фібробетонів. З використанням даних моделей проведено вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів для доріг II-III та I6 категорій.

Вибір оптимальних складів фібробетонів здійснювався графічним методом на діаграмах типу квадрат. Застосовано прийом представлення факторного простору у вигляді 7 діаграм типу «квадрат» при фіксуванні кількості цементу у складі від 290 до 350 кг/м³ з кроком 10 кг/м³. Така дискретизація дозволяє наочніше і точніше проводити пошук оптимальних рішень.

У якості критеріїв обмеження використовувалися рівні міцності на стиск, міцності на розтяг при згині і морозостійкості, які відповідають вимогами ДБН В.2.3-4:2015 до матеріалів покриттів доріг відповідної категорії. У якості критерію оптимізації використовувався показник собівартості бетону. При виборі також контролювалася стиранисть бетону.

Обрано два склади фібробетонів для доріг II і III категорій, які мають міцність на стиск 43 і 45 МПа, міцність на розтяг при згині 5 і 5,1 МПа, стриманість близько 0,36 г/см² і морозостійкість F200. Також обрано два склади фібробетонів для доріг I6 категорії. Дані склади мають міцність на стиск 48 і 50 МПа, міцність на розтяг при згині 5,5 МПа, стриманість близько 0,35 г/см² і морозостійкість F200.

Обрані склади мають найменшу собівартість при забезпеченій міцності та довговічності матеріалу. Застосування таких фібробетонів дозволяє підвищити міжремонтні інтервали при експлуатації цементобетонних доріг в типових для України кліматичних умовах.

Ключові слова: жорстке дорожнє покриття, експериментально-статистична модель, оптимізація, базальтова фібра, суперпластифікатор.

SEARCH FOR OPTIMAL COMPOSITIONS OF FIBER- REINFORCED CONCRETE FOR RIGID PAVEMENT USING EXPERIMENTAL STATISTICAL MODELS

S. Kroviakov¹, A. Ihnatenko¹, L. Shestakova¹, M. Zavaloka¹

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: The experiment was conducted according to a 15-point plan. In the experiment, the following three factors of the composition of rigid pavement fiber-reinforced concrete varied: the amount of Portland cement from 290 to 350 kg/m³, the amount of basaltic fiber from 0.9 to 1.5 kg/m³,

the amount of superplasticizer from 0.6 to 1% of the cement mass. A set of experimental statistical models was obtained. They describe the influence of factors on compressive strength, flexural strength, frost resistance, abrasion resistance and cost of fiber-reinforced concrete. The selection of optimal compositions of fiber-reinforced concrete rigid pavement for the roads of II-III and Ib categories was carried out using these models.

The selection of optimal compositions of fiber-reinforced concrete was carried out graphically using square diagrams. The method of representing the factor space as 7 "square" type diagrams was used when fixing the amount of cement in the composition from 290 to 350 kg/m³ with a step of 10 kg/m³. This discretization allows for a clearer and more accurate search for optimal solutions.

The levels of compressive strength, flexural strength and frost resistance were used as limitation criteria. These levels meet the requirements of DBN B.2.3-4:2015 for rigid pavement materials of the corresponding category. The concrete cost index was used as an optimization criterion. The abrasion resistance of concrete was also controlled to guarantee a correct choice.

Two compositions of fiber-reinforced concrete for the roads of the II and III categories were chosen. These compositions have a compressive strength of 43 and 45 MPa, a flexural strength of 5 and 5.1 MPa, abrasion of about 0.36 g/cm² and frost resistance of F200. Two compositions of fiber-reinforced concrete for category Ib roads were also selected. These compositions have a compressive strength of 48 and 50 MPa, a flexural strength of 5.5 MPa, abrasion of about 0.35 g/cm² and frost resistance of F200.

The compositions have chosen the lowest cost price while ensuring the strength and durability of the material. The use of this fiber-reinforced concrete makes it possible to increase the intervals between repairs during the maintenance of cement concrete roads in typical climatic conditions in Ukraine.

Keywords: rigid pavement, experimental statistical model, optimization, basalt fiber, superplasticizer.

1 ВСТУП

В останні роки в Україні все активніше будуються дороги з жорсткими покриттями. Також цементобетонні покриття все частіше використовуються при реконструкції доріг, насамперед на найбільш завантажених ділянках. Жорсткі покриття в порівнянні асфальтобетонними покриттями краще розподіляють навантаження на ґрунт, не схильні до утворення колій та хвиль і мають значно більшу довговічність. Дисперсне армування не схильною до корозії фіброю дозволяє ще більше підвищити довговічність та міцність бетонів дорожніх покриттів.

Проте вартість влаштування цементобетонних доріг є дещо вищою, що обумовлено насамперед вартістю самого бетону. Тому задача пошуку оптимальних з точки зору механічних характеристик, довговічності та вартості складів бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів є актуальною. Ефективно вирішувати такі задачі дозволяє використання методу багатокритеріального аналізу, який спирається на експериментально-статистичні моделі. При цьому важливо орієнтуватися на реальну ринкову вартість компонентів бетонних сумішей.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У США та більшості країн Європейського союзу частка автомобільних доріг з жорсткими покриттями становить від 25 до 40%. Простежується тенденція до зростання будівництва цементобетонних автомагістралей у Китаї та Японії [1].

Незважаючи на великий світовий досвід будівництва цементобетонних доріг при їх проектуванні та розробці складів бетонів дорожніх покриттів необхідно приділяти особливу увагу використанню місцевих будівельних матеріалів. В свою чергу, це вимагає постійної оптимізації складів бетонів в залежності від вимог до бетону, застосованих матеріалів та рівня ринкових цін на ці матеріали [2,3].

В Україні основними причинами пошкоджень і зношення дорожніх покриттів в процесі експлуатації є дія заморожування і відтавання та динамічних впливів коліс транспорту. В умовах таких впливів ефективними матеріалами для дорожніх покриттів є фібробетони зі стійкою до корозії дисперсною арматурою, зокрема поліпропіленовою базальтовою і скляною [4,5]. Базальтові волокна можна рекомендувати до масового використання у дорожньому будівництві завдяки їх порівняно низькій вартості та здатності достатньо легко розподілятися в бетонній суміші при перемішуванні [6,7].

Відомо, що бетони і фібробетони жорстких дорожніх покриттів можуть забезпечувати необхідний рівень механічних властивостей та економічної ефективності лише при застосуванні сучасних суперпластифікаторів [2,8]. Тому використання таких добавок є нормою у практиці виробництва бетонів.

При пошуку оптимальних складів багатоконпонентних матеріалів, зокрема бетонів, ефективним є використання методів планування експерименту та експериментально-статистичного (ЕС) моделювання [9,10]. Отриманий завдяки застосуванню таких методів комплекс ЕС-моделей, які відображають зв'язок складу багатоконпонентного матеріалу з його властивостями, дозволяє провести багатокритеріальну оптимізацію складу дослідженого матеріалу [9,11].

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є вибір оптимальних з позиції міцності, довговічності та собівартості складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для автомобільних доріг II-III та Ib категорій.

Міцність бетонів на стиск і на розтяг при згині, а також морозостійкість бетонів мають відповідати вимогам ДБН В.2.3-4:2015 [12] для відповідної категорії. До бетонів доріг II і III категорій висуваються однакові вимоги, до бетонів доріг Іб категорії – вищі. При цьому собівартість обраних складів має бути близькою до мінімальної. Це важливо з врахуванням значного об'єму бетону, що використовується при влаштуванні жорстких дорожніх покриттів. Також при виборі оптимальних складів враховується зносостійкість (стиранність) досліджених фібробетонів, яка разом з морозостійкістю є важливою з позиції забезпечення довговічності дорожнього покриття.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

За 15-ти точковим оптимальним симетричним планом був проведений експеримент, в якому варіювалися наступні 3 фактори складу фібробетонів жорсткого дорожнього покриття [13]:

- X_1 , кількість портландцементу ПЦ І-500Р-Н, від 290 до 350 кг/м³;
- X_2 , кількість базальтової фібри ВАUCON®-bazalt, від 0,9 до 1,5 кг/м³;
- X_3 , кількість суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G, від 0,6 до 1% від маси цементу.

При побудові ЕС-моделей перехід від натуральних до кодованих рівнів варійованих факторів виконано за типовою процедурою [9,11].

Всі бетонні суміші мали рівну рухомість S1 (OK = 2..3 см). При виборі оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів використовувався наведений нижче комплекс ЕС-моделей, що описують вплив варійованих факторів складу бетону на його властивості.

Вплив на міцність на стиск:

$$f_{cm}(\text{МПа}) = 51,58 + 9,33x_1 - 1,43x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,31x_1x_3 + 0,94x_2 - 0,78x_2^2 - 0,26x_2x_3 \quad (1)$$

Вплив на міцність на розтяг при згині:

$$f_{c.tf}(\text{МПа}) = 5,722 + 0,832x_1 - 0,268x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,341x_2 - 0,283x_2^2 - 0,26x_2x_3 + 0,101x_3 - 0,173x_3^2 \quad (2)$$

Вплив на морозостійкість:

$$F(\text{цикли}) = 240 + 55x_1 + 25x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 15x_2 - 25x_2^2 \pm 0x_1x_2 + 15x_3 - 25x_3^2 \quad (3)$$

Вплив на стиранність:

$$G(\text{г / см}^2) = 0,340 - 0,027x_1 + 0,009x_1^2 - 0,006x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 0,019x_2 + 0,009x_2^2 \pm 0x_2x_3 - 0,005x_3 + 0,009x_3^2 \quad (4)$$

Вплив на собівартість бетону, розраховану в цінах грудня 2023 року:

$$\begin{aligned} \text{Var} (\text{грн./ м}^3) = & 3151,12 + 155,53x_1 \pm 0x_1^2 + 12,31x_1x_2 + 17,440x_1x_3 \\ & + 47,05x_2 \pm 0x_2^2 - 12,81x_2x_3 \\ & + 43,27x_3 - 10,79x_3^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Вибір оптимальних складів фібробетонів здійснювався графічним методом на діаграмах типу квадрат [9]. Тривимірна діаграма типу «куб» охоплює весь факторний простір експерименту, але при одночасному накладенні на діаграмі такого типу значного числа ізоповерхонь декількох показників її читання стає складним. Тому в даному дослідженні було застосовано прийом представлення факторного простору у вигляді 7 діаграм типу «квадрат» з осями X_2 і X_3 . Квадрати будувалися при фіксуванні рівня фактору x_1 від -1 до $+1$ з кроком $0,333$, що відповідає кількості цементу у складі від 290 до 350 кг/м^3 з кроком 10 кг/м^3 (рис.1, рис.2). Така дискретизація дозволяє наочніше і точніше проводити пошук оптимальних рішень.

Як відмічалось вище, проводився вибір оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для автомобільних доріг II і III категорій та окремо для доріг Ib категорії. Відповідно керуючись вимогами ДБН В.2.3-4:2015 (додаток К) [12] до матеріалів покриттів доріг II і III категорій у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення характеристик фібробетонів (рис.1):

- міцність на стиск $f_{cm} \geq 40$ МПа (клас В30, С25/30), побудовані за ЕС-моделлю (1) ізоляції зеленого кольору;

- міцність на розтяг при згині $f_{c,tf} \geq 5$ МПа (клас В_{btb}4,0), побудовані за ЕС-моделлю (2) ізоляції червоного кольору;

- морозостійкість $\geq F200$, побудовані за ЕС-моделлю (3) ізоляції синього кольору.

У якості критерію оптимізації [9,11] використовувався показник собівартості бетону. Ізоляції собівартості побудовані за ЕС-моделлю (5) і показані на діаграмах сірим кольором. При виборі також контролювалася стиранність бетону. Ізоляції стиранності побудовані за ЕС-моделлю (4) і показані штиховими лініями коричневого кольору.

Області діаграм, які не відповідали критеріям обмеження за міцністю і морозостійкістю, заштриховувалися відповідним кольором. У не заштрихованих зонах, тобто при виконанні всіх визначених критеріїв якості, було обрано два оптимальних склади фібробетонів для доріг II і III категорій. Перший склад при кількості цементу 300 кг/м^3 (рис.1.б), другий – при кількості цементу 310 кг/м^3 (рис.1.в). Координати даних складів помічено на діаграмах зірками з відповідними цифрами.

Аналогічним чином, керуючись вимогами ДБН В.2.3-4:2015, при виборі оптимальних складів фібробетонів для доріг Ib категорії у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення (рис.2):

- міцність на стиск $f_{cm} \geq 45$ МПа (клас В35, С28/35);

- міцність на розтяг при згині $f_{c,tf} \geq 5,5$ МПа (клас В_{btb}4,4);

- морозостійкість $\geq F200$.

Для доріг Ib категорій також було обрано два оптимальних склади фібробетонів, координати яких помічено на діаграмах зірками з відповідними цифрами. Перший склад при кількості цементу 310 кг/м^3 (рис.2.в), другий – при кількості цементу 320 кг/м^3 (рис.2.г).

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Обраний склад №1 для доріг II і III категорій має найменшу собівартість при забезпеченні необхідних рівнів всіх висунутих критеріїв – 3040 грн./м³. Координати точки даного складу фібробетону в факторному просторі експерименту є наступними: $x_1 = -0,667$, $x_2 = 0,18$, $x_3 = -0,45$.

Склад №2 доріг II і III категорій має собівартість 3060 грн./м³, що лише на 0,66% вище собівартості складу №1. При цьому у порівнянні зі складом №1 фібробетон складу №2 характеризується дещо вищою міцністю на стиск. Координати точки даного складу є наступними: $x_1 = -0,333$, $x_2 = -0,4$, $x_3 = -0,45$.

Склад №1 для доріг Iб категорії має собівартість 3120 грн./м³. Координати точки даного складу фібробетону є наступними: $x_1 = -0,333$, $x_2 = 0,38$, $x_3 = 0,1$.

Склад №2 для доріг Iб категорії має майже аналогічну собівартість – 3125 грн./м³, при цьому характеризується дещо вищою міцністю на стиск. Координати точки даного складу фібробетону: $x_1 = 0$, $x_2 = -0,1$, $x_3 = -0,55$.

Вміст компонентів суміші у обраних складах і розрахункові механічні характеристики фібробетонів даних оптимальних складів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Обрані оптимальні складі фібробетонів дорожніх покриттів
та їх механічні характеристики

№ складу	Склад фібробетону	Розрахункові механічні характеристики та собівартість
№1 для доріг II і III категорій	Цемент – 300 кг/м ³ Щебінь – 1222 кг/м ³ Пісок – 835 кг/м ³ Фібра VAUCON®-bazalt – 1,26 кг/м ³ Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,13 кг/м ³ Вода – 126 л/м ³	Міцність на стиск $f_{cm} = 43$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c.tf} = 5$ МПа Морозостійкість F200 Стиранність $G = 0,365$ г/см ² Собівартість – 3040 кг/м ³
№2 для доріг II і III категорій	Цемент – 310 кг/м ³ Щебінь – 1219 кг/м ³ Пісок – 821 кг/м ³ Фібра VAUCON®-bazalt – 1,08 кг/м ³ Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,20 кг/м ³ Вода – 129 л/м ³	Міцність на стиск $f_{cm} = 46$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c.tf} = 5,1$ МПа Морозостійкість F200 Стиранність $G = 0,357$ г/см ² Собівартість – 3060 кг/м ³
№1 для доріг Iб категорії	Цемент – 310 кг/м ³ Щебінь – 1219 кг/м ³ Пісок – 820 кг/м ³ Фібра VAUCON®-bazalt – 1,32 кг/м ³ Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,54 кг/м ³ Вода – 128 л/м ³	Міцність на стиск $f_{cm} = 48$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c.tf} = 5,5$ МПа Морозостійкість F200 Стиранність $G = 0,344$ г/см ² Собівартість – 3120 кг/м ³
№2 для доріг Iб категорії	Цемент – 320 кг/м ³ Щебінь – 1215 кг/м ³ Пісок – 803 кг/м ³ Фібра VAUCON®-bazalt – 1,17 кг/м ³ Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,22 кг/м ³ Вода – 134 л/м ³	Міцність на стиск $f_{cm} = 50$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c.tf} = 5,5$ МПа Морозостійкість F200 Стиранність $G = 0,35$ г/см ² Собівартість – 3125 кг/м ³

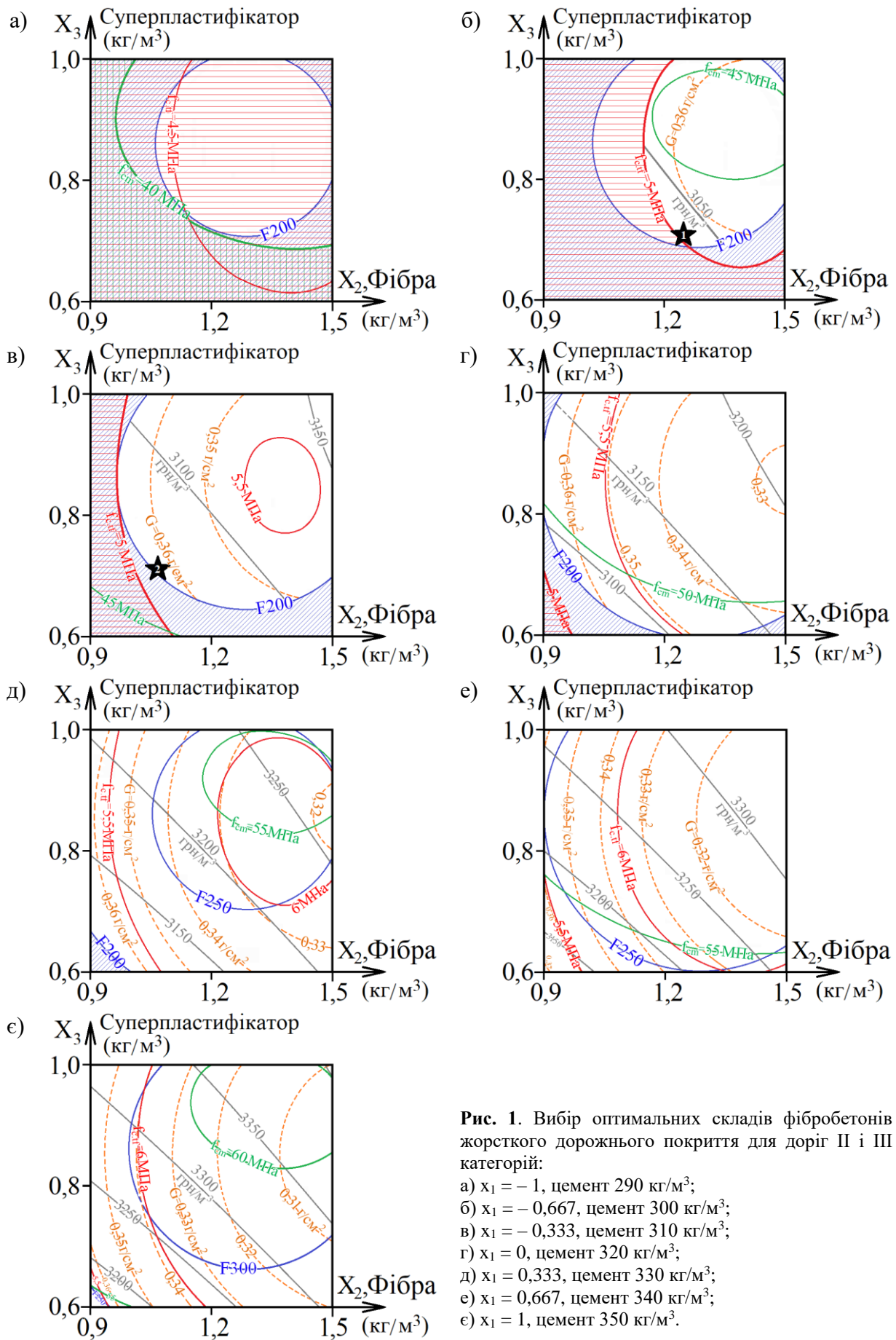


Рис. 1. Вибір оптимальних складів фіробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг II і III категорій:

- а) $x_1 = -1$, цемент 290 кг/м³;
- б) $x_1 = -0,667$, цемент 300 кг/м³;
- в) $x_1 = -0,333$, цемент 310 кг/м³;
- г) $x_1 = 0$, цемент 320 кг/м³;
- д) $x_1 = 0,333$, цемент 330 кг/м³;
- е) $x_1 = 0,667$, цемент 340 кг/м³;
- є) $x_1 = 1$, цемент 350 кг/м³.

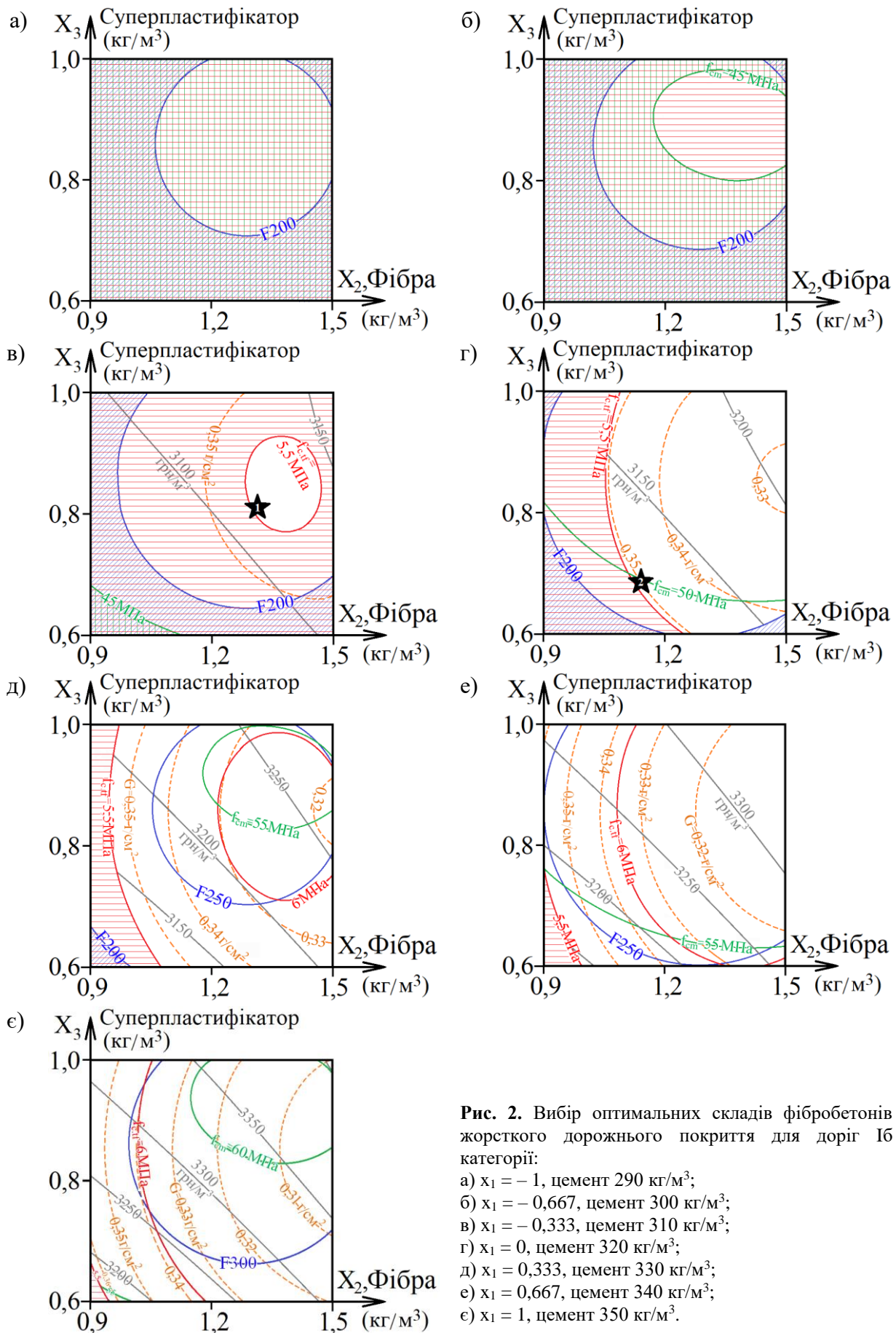


Рис. 2. Вибір оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг Іб категорії:

- а) $x_1 = -1$, цемент 290 кг/м³;
- б) $x_1 = -0,667$, цемент 300 кг/м³;
- в) $x_1 = -0,333$, цемент 310 кг/м³;
- г) $x_1 = 0$, цемент 320 кг/м³;
- д) $x_1 = 0,333$, цемент 330 кг/м³;
- е) $x_1 = 0,667$, цемент 340 кг/м³;
- є) $x_1 = 1$, цемент 350 кг/м³.

6 ВИСНОВКИ

З використанням комплексу 3-х факторних ЕС-моделей проведена багатокритеріальна оптимізація та обрані оптимальні склади фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг різних категорій. Обрані склади мають найменшу собівартість при забезпеченій міцності та довговічності матеріалу. Застосування таких фібробетонів дозволяє підвищити міжремонтні інтервали при експлуатації цементобетонних доріг в типових для України кліматичних умовах.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають будь-яких фінансових чи нефінансових інтересів щодо матеріалів, представлених у цій статті, які слід розкривати.

Література

1. Гамеляк І. П., Островерхий О. Г., Мороз В. С. Історія та перспективи будівництва цементобетонних покриттів автомобільних доріг та аеродромів в Україні. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2019, Вип.106, С. 60-76.
2. Дворкін Л. Й. Бетони спеціального призначення. Київ: Кондор. 2018. 354 с.
3. Гамеляк І. П., Шургая А. Г., Якименко Я. М., Чиженко Н. П. Математичні моделі властивостей високоміцних бетонів для дорожнього будівництва. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2017, №169, С. 103-110. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084>
4. 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>.
5. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskiy V., Crnoja A. Influence of fibers and hardening accelerator on the concrete for rigid pavements. Magazine of Concrete Research, 2023, 75(17), pp. 865-873. <https://doi.org/10.1680/jmacr.22.00181>
6. Wu H., Qin X., Huang X., Kaewunruen S. Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete. Materials. 2023, 16, 623. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>
7. Jin Sj., Yang Yh., Sun Ym., Li X., Xu Jy. Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions. KSCE Journal of Civil Engineering. 2023, 27, pp. 3455–3470. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9>
8. Tahir M.F.M., Abdullah M.M.A.B., Rahim S.Z.A., Mohd Hasan M.R., Sandu A.V., Vizureanu P., Ghazali C.M.R., Kadir A.A. Mechanical and durability analysis of fly ash based geopolymer with various compositions for rigid pavement applications, Materials, 2022, 15, 3458. <https://doi.org/10.3390/ma15103458>
9. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.
10. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical experiment planning in concrete technology. 2012, Nova Science Publishers, 173 p.
11. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів. К.: Кондор. 2020. 205 с.
12. 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.
13. Кровяков, С. О., Шестакова, Л. Є. Вплив базальтової фібри і суперпластифікатору на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів. Сучасне будівництво та архітектура, 2023, №6, С.99-108. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-99-108>

References

1. Gameliak, I. P., Ostroverkhyi, O. G., Moroz, V. S. (2019). Istoriya ta perspektyvy budivnytstva tsementobetonnykh pokryttiv avtomobil'nykh doroh ta aerodromiv v Ukrayini [History and perspectives of construction cement-concrete road and airfield pavement in Ukraine]. *Automobile roads and road construction*. Iss. 106. 60–76. [in Ukraine].
2. Dvorkin, L. Y. (2018) Betony spetsial'noho pryznachennya [Special purpose concretes] (monograph) Kyiv: Kondor. 354.
3. Gameliak, I. P., Shurgaya, A. G., Jakymenko, J. M., Chyzhenko N. P. (2017) Matematychni modeli vlastyvostry vysokomitsnykh betoniv dlya dorozhn'oho budivnytstva [Mathematical models of the properties of high-strength cement – concrete for road construction]. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 169. 103–110. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084> [in Ukraine].
4. Hussain, I., Ali, B., Akhtar, T., Jameel, M.S., Raza, S.S. (2020) 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. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
5. Kos, Ž., Kroviakov, S., Kryzhanovskiy, V., Crnoja, A. (2023) Influence of fibers and hardening accelerator on the concrete for rigid pavements. *Magazine of Concrete Research*. 75(17). 865-873. <https://doi.org/10.1680/jmacr.22.00181>
6. Wu, H., Qin, X., Huang, X., Kaewunruen, S. (2023) Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete. *Materials*. 16, 623. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>
7. Jin, S.j., Yang, Yh., Sun, Ym., Li, X., Xu, Jy. (2023) Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 27, 3455–3470. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9>
8. Tahir, M.F.M., Abdullah, M.M.A.B., Rahim, S.Z.A., Mohd Hasan, M.R., Sandu, A.V., Vizureanu, P., Ghazali, C.M.R., Kadir, A.A. (2022) Mechanical and durability analysis of fly ash based geopolymer with various compositions for rigid pavement applications, *Materials*. 15, 3458. <https://doi.org/10.3390/ma15103458>
9. Lyashenko, T. V., Voznesenskiy, V. A. (2017) Metodologiya retsepturno-tekhnologicheskikh poley v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii [Methodology of recipe-technological fields in computer construction materials science]. Odesa: Astroprint, 168 [in Russian].
10. Dvorkin, L., Dvorkin, O., Ribakov, Y. (2012) Mathematical experiment planning in concrete technology, Nova Science Publishers, 173.
11. Dvorkin, L. Y. (2020) Eksperymental'no-statystychni modelyuvannya pry proektuvanni skladiv betoniv [Experimental and statistical modeling in the design of concrete compositions]. Kyiv: Kondor, 205 [in Ukraine].
12. DBN V.2.3-4:2015. Avtomobil'ni dorohy. Sporudy transportu. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo [Automobile roads. Part I. Design. Part II. Construction]. Minrehionbud Ukrayiny, 2015 [in Ukraine].
13. Kroviakov, S. O., Shestakova, L. Y. (2023) Vplyv bazal'tovoyi fibry i superplastyfikatoru na mitsnist' betoniv zhorstkykh dorozhnykh pokryttiv [The influence of basalt fiber and superplasticizer on the strength of concrete for rigid pavements]. *Modern construction and architecture*, 2023, 6, 99-108 <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-99-108>

Кровяков Сергій Олексійович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.т.н., професор
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029
skrovyakov@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0800-0123

Ігнатенко Андрій Васильович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029
andreykhadi@gmail.com



ORCID: 0000-0001-9222-1051

Шестакова Любов Євгенівна

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
аспірантка

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029

shestakova_luba@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3449-8498

Заволока Михайло Васильович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
к.т.н., професор

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029

mvzavoloka@ukr.net

ORCID: 0000-0002-2080-1230

Для посилань:

Кровяков С. О., Ігнатенко А. В., Шестаков Л. Є., Заволока М. В. Пошук оптимальних складів фібробетонів жорсткого дροжнього покриття з використанням експериментально-статистичних моделей. Механіка та математичні методи, 2024. Т. 6. № 1. С. 6–16.

For references:

S. Kroviakov, A. Ihnatenko, L. Shestakova, M. Zavoloka. (2024). Search for optimal compositions of fiber-reinforced concrete for rigid pavement using experimental statistical models. Mechanics and Mathematical Methods. 6 (1). 6–16.