

УДК 691.32

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ СКЛАДІВ БЕТОНІВ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ І ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННОГО ЩЕБЕНЮ ПОКРОКОВИМ СКАНУВАННЯМ ПОЛІВ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Кровяков С. О.¹, Шимченко П. В.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація: Зруйновані та демонтовані залізобетонні конструкції є перспективною сировиною для виробництва щебеню. Бетони на основі вторинного щебеню вигідно використовувати в транспортному будівництві.

За оптимальним планом проведений експеримент, в якому варіювалися 3 фактори складу бетону на вторинному щебені: частина цементу, що замінюється золою виносом (від 0 до 20%); кількість суперпластифікатора полікарбоксилатного типу (від 3,0 до 4,8 кг/м³); кількість поліпропіленової фібри (від 0 до 3,0 кг/м³). Всі бетонні суміші мали рухомість S1. Розраховано комплекс експериментально-статистичних (ЕС) моделей, що описують вплив варіюваних факторів на міцність бетону на стиск, міцність на розтяг при згині, морозостійкість, стиранність та собівартість виготовлення 1 м³ суміші.

Пошуку оптимальних складів бетонів для жорстких дорожніх покриттів і транспортних споруд реалізовано покроковим сканування полів властивостей за ЕС-моделями. Оптимальні склади мають забезпечувати нормативні рівні міцності на стиск (не менш 40 МПа для бетонів дорожніх покриттів та не менш 50 МПа для бетонів транспортних споруд), міцності на розтяг при згині (не менш 5 МПа), морозостійкості (не менш F200) та зносостійкості (не більш 0,5 г/см²) бетону при мінімізації собівартості їх виготовлення. Крок генерації координат розрахункових точок при скануванні прийнято відповідно до технологічних особливостей процесу виготовлення бетонних сумішей в промислових умовах. В кожній з генерованих точок за відповідними ЕС-моделями були розраховані значення досліджених механічних показників, які автоматично порівнювалися з рівнем висунутих критеріїв обмеження. За результатами перевірки було проведено відсіювання точок (наборів координат), які не забезпечували виконання одночасно всіх критеріїв обмеження. Надалі точки, що залишилися з початкового масиву, були проранжовані за значенням показника собівартості 1 м³, що дало змогу з високою точністю визначити оптимальні склади бетонів. Визначені склади бетонів забезпечують необхідний рівень механічних показників матеріалу, мають мінімальну собівартість з врахуванням поточних ринкових цін, та є ефективними з екологічної точки зору.

Ключові слова: вторинний щебінь, фібра, зола виносення, експериментально-статистичне моделювання, сканування полів властивостей, жорстке дорожнє покриття, оптимізація.

SEARCH FOR OPTIMAL COMPOSITIONS OF CONCRETE FOR RIGID PAVEMENT AND TRANSPORT STRUCTURES USING RECYCLED AGGREGATE BY STEP-BY-STEP SCANNING OF PROPERTY FIELDS

S. Kroviakov¹, P. Shymchenko¹

¹Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: Destroyed and dismantled reinforced concrete structures represent a promising raw material source for the production of recycled aggregate. Concrete based on recycled aggregate is advantageous for use in transportation construction.

An experiment was carried out according to an optimal experimental design, in which three composition factors of concrete with recycled aggregate were varied: the proportion of cement



replaced by fly ash (from 0 to 20%); the dosage of polycarboxylate-based superplasticizer (from 3.0 to 4.8 kg/m³); and the content of polypropylene fiber (from 0 to 3.0 kg/m³). All concrete mixtures had a slump class S1. A set of experimental–statistical (ES) models was developed to describe the influence of the varied factors on compressive strength, flexural tensile strength, freeze–thaw resistance, abrasion resistance, and the production cost of 1 m³ of concrete mixture.

The search for optimal concrete compositions for rigid pavements and transportation structures was implemented through step-by-step scanning of property fields using the ES models. The optimal compositions were required to ensure normative performance levels of compressive strength (not less than 40 MPa for rigid pavement concretes and not less than 50 MPa for concretes of transportation structures), flexural tensile strength (not less than 5 MPa), freeze–thaw resistance (not less than F200), and abrasion resistance (not more than 0.5 g/cm²), while minimizing production cost. The step size for generating calculation points during scanning was adopted in accordance with the technological features of concrete production under industrial conditions. At each generated point, the values of the investigated mechanical properties were calculated using the corresponding ES models and automatically compared with the specified constraint criteria. Based on the verification results, points (sets of coordinates) that failed to satisfy all constraint criteria simultaneously were eliminated. The remaining points from the initial dataset were ranked according to the cost indicator of 1 m³ of concrete mixture, which made it possible to determine the optimal concrete compositions with high accuracy. The identified compositions ensure the required mechanical performance of the material, have minimal production cost considering current market prices, and are environmentally efficient.

Keywords: recycled aggregate, fiber, fly ash, experimental–statistical modeling, property field scanning, rigid pavement, optimization

1 ВСТУП

В результаті бойових дій чисельних пошкоджень зазнала транспортна інфраструктура України, повністю або частково зруйновано багато будівель та споруд [1]. Відновлення інфраструктури потребує значних обсягів бетонних робіт, відповідно витрат бетону. Найбільшим за питомою вагою компонентом бетонної суміші є щебінь. Зруйновані та демонтовані конструкції є сировиною для виробництва вторинних заповнювачів, зокрема щебеню. Використання вторинного щебеню є важливою економічною і екологічною задачею, при цьому саме транспортне будівництво можна вважати найбільш перспективним об'єктом застосування перероблених заповнювачів. Тому актуальною є задача розробки ефективних бетонів для конструкцій дорожніх покриттів і транспортних споруд на основі вторинного щебеню та з максимальним залученням відходів виробництва. Можливість отримання бетонів з високими показниками міцності та довговічності при використанні вторинного щебеню, насамперед з перероблених залізобетонних конструкцій, підтверджена в роботах багатьох авторів [2, 3 та ін.].

Задача зниження енерговитрат на виробництво бетонів залишається актуальною для України та інших країн. Серед компонентів бетонної суміші найбільше енергії витрачається на виробництво цементу. Відповідно доцільним є заміна частини цементу золою або іншими відходами виробництва [4]. Також це сприяє зниженню викидів CO₂ в атмосферу, що відповідає задачам сталого розвитку [5]. Ефективність використання золи в бетонах жорстких дорожніх покриттів підтверджена у роботах [6, 7, 8 та ін.]. Завдяки різноспрямованим та динамічним навантаженням на конструкції для бетонів дорожніх покриттів та транспортних споруд також ефективним є дисперсне армування, зокрема поліпропіленовою фіброю [9, 10].

При виробництві бетонів жорстких дорожніх покриттів задача економії ресурсів та/або зниження екологічних наслідків має вирішуватися з врахуванням вимог до фізико-механічних властивостей бетонів. Тобто на практиці необхідно проводити оптимізацію складу бетонної суміші в залежності від фактично використаних матеріалів для її приготування, забезпечивши необхідний для конкретного типу конструкцій рівень міцності, морозостійкості та інших унормованих механічних показників бетону [11, 12].

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Одним з найбільш ефективних і якісно опрацьованих методів багатокритеріальної оптимізації складів бетонів як композиційних матеріалів є пошук рішень за комплексом експериментально-статистичних (ЕС) моделей, розрахованих за результатами планованого експерименту [11, 13, 14]. Кожна ЕС-модель комплексу відображає вплив варійованих факторів на один конкретний фізико-механічний або структурний показник. Завдяки тому, що всі моделі комплексу побудовані в однакових межах факторного простору експерименту, їх спільний аналіз при суміщенні полів властивостей (відгуків) дозволяє проводити пошук оптимальних рішень. При суміщенні визначається область припустимих рішень, тобто у який методом випадковим виконуються вимоги щодо всіх висунутих критеріїв обмеження. В даній області з врахуванням критерію або критеріїв оптимізації визначається оптимальне рішення [13, 15].

Пошук рішень за описаним вище принципом може проводитися графічним методом на відповідних діаграмах або методом випадкового сканування полів властивостей (методом Монте-Карло). Перевагою графічного методу вибору

оптимальних рішень є його наочність, що робить його достатньо зручнішим в інженерній практиці. Прикладами застосування графічного методу аналізу діаграм для пошуку оптимальних складів бетонів є роботи [12, 16, 17, 18 та ін.].

При реалізації методу випадковим сканування полів властивостей (Монте-Карло) генерується набір випадкових координат у межах факторного простору експерименту, наприклад 10000 координат. Для задач оптимізації складу бетону – це відповідний набір різних складів бетону. Координати кожного випадково генерованого складу підставляються у відповідні ЕС-моделі. Далі проводиться процес «фільтрації» за критеріями обмеження та формується набір точок на суміщених полях властивостей, в яких рівні проаналізованих властивостей відповідають всім критеріям – тобто згадана вище область припустимих рішень. В даній області за відповідною ЕС-моделлю розраховується значення критерію оптимізації для всього набору точок та приймається рішення. Ця процедура для підвищення точності може проводитися в декілька ітерацій з поступовим наближенням до оптимального рішення. Прикладами застосування методом випадкового сканування полів властивостей для визначення оптимальних складів будівельних композитів є роботи [19, 20, 21 та ін.].

Метод випадкового сканування полів властивостей (метод Монте-Карло) дозволяє знаходити оптимальні рішення з високою точністю. Фактично точність рішення може залежати від кількості проведених випадкових «сканувань» поля властивостей, тобто генерованих випадкових координат точок у факторному просторі. Але для сучасних обчислювальних потужностей не важким завданням є генерація навіть мільйонів таких точок. Відповідно точність рішень у більшій мірі визначається точністю апроксимації досліджених властивостей самими ЕС-моделями.

Важливо зазначити, що за результатами реалізації методу випадкового сканування полів властивостей для пошуку оптимального складу бетону рішення, що буде знайдено, навіть при своїй точності може знаходитися не у повній відповідності до реальних технологічних можливостей промислового обладнання. Тобто наприклад відповідати дозуванню портландцементу з точністю до сотих кг на м³, або фібри з точністю до грамів на м³. Звичайно, таке рішення можна без суттєвої втрати точності «округлити» до найближчого технологічно можливого. Проте це, по-перше, вимагає відповідної кваліфікації дослідника, по-друге, робить не ефективною обробку занадто значної кількості випадкових координат у межах факторного простору експерименту.

З урахуванням наведеного вище автори пропонують відповідно до технологічних особливостей процесу виготовлення бетонних сумішей у промислових умовах для пошуку оптимального складу бетону реалізовувати сканування полів властивостей за ЕС-моделями не випадковою генерацією координат точок, а покроковою генерацією з технологічно обґрунтованим кроком.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є визначення оптимальних складів бетонів дорожніх покриттів і транспортних споруд з використанням вторинного щебеню за рахунок проведення покрокового сканування полів властивостей. Оптимальні склади мають забезпечувати нормативні рівні міцності, морозостійкості та зносостійкості бетону при мінімізації собівартості їх виготовлення.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

За 15-ти точковим симетричним планом Бокса-Бенкена [13, 14] був проведений 3-х факторний експеримент, в якому варіювалися наступні фактори складу бетону на вторинному щебені:

X_1 , частина цементу, що замінюється золою виносення Даницької ТЕЦ (м. Київ), від 0 до 20%. «Базовий» склад бетонної суміші містив 300 кг/м³ цементу. Для заміни 10% цементу (30 кг/м³) використовувалося 70 кг золи виносу, для заміни 20% цементу (60 кг/м³) – 140 кг золи виносу;

X_2 , кількість суперпластифікатору полікарбоксилатного типу MC-PowerFlow 3200, від 3,0 до 4,8 кг/м³, що відповідало діапазону від 1,0 до 1,6% від маси цементу в сумішах «базового» складу;

X_3 , кількість поліпропіленової фібри Vaumesh (довжина волокон 36 мм, діаметр 0,68 мм), від 0 до 3,0 кг/м³.

Для приготування бетонів використовувався вторинний щебінь фракції 5-20 мм, отриманий в результаті переробки залізобетонних конструкцій, кварцовий пісок з $M_{кр} = 2,3$ та портландцемент ПЦ II/A-III-500. Всі бетонні суміші мали рухомість S1, що досягалося підбором кількості води у їх складі. Детально умови проведення експерименту, його план і склади досліджених бетонів наведено у [22].

Для кожного з 15-ти досліджених у експерименті складів бетону згідно діючим стандартам визначалася міцність на стиск (f_{cm}), міцність на розтяг при згині (f_{ctk}), морозостійкість (F) та стиранність (G). Нижче наведені адекватні ЕС-моделі, які описують вплив варійованих факторів складу на дані фізико-механічні показники. При побудові ЕС-моделей згідно методик [13, 14] натурний діапазон варіювання факторів X_i кодувався в безрозмірний x_i зі значеннями від -1 до 1.

$$f_{cm} \text{ (МПа)} = 53,17 - 4,10x_1 + 1,58x_2 + 0,75x_3 - 6,11x_1^2 \pm 0x_2^2 + 1,41x_3^2 \pm 0x_1x_2 + 1,62x_1x_3 \pm 0x_2x_3, \quad (1)$$

$$f_{ctk} \text{ (МПа)} = 5,092 - 0,056x_1 + 0,048x_2 + 0,191x_3 - 0,168x_1^2 - 0,058x_2^2 - 0,063x_3^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 0,036x_2x_3, \quad (2)$$

$$F \text{ (марка)} = 198,6 + 5,0x_1 + 20,0x_2 + 20,0x_3 \pm 0x_1^2 - 21,40x_2^2 - 21,4x_3^2 - 6,3x_1x_2 - 6,3x_1x_3 + 6,3x_2x_3 \quad (3)$$

$$G \text{ (г / см}^2\text{)} = 0,471 + 0,007x_1 - 0,005x_2 - 0,020x_3 + 0,008x_1^2 + 0,004x_2^2 + 0,007x_3^2 + 0,002x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,003x_2x_3. \quad (4)$$

Також для кожного складу була розрахована собівартість виготовлення 1 м³ бетонної суміші в цінах січня 2026 року. Звичайно, фактична собівартість виготовлення суміші в промислових умовах буде також залежною від обсягу виробництва, плеча доставки компонентів та інших чинників. Проте розрахункова собівартість в цілому є об'єктивною і може використовуватися для аналізу та оцінки економічної ефективності запропонованих рішень. Таким чином, ЕС-модель, що описує вплив варійованих факторів складу на собівартість виготовлення бетонної суміші має вигляд:

$$\text{Соб(грн / м}^3\text{)} = 3585,37 - 95,77x_1 + 150,35x_2 + 344,06x_3 - 1,22x_1^2 \pm 0x_2^2 - 0,46x_3^2 - 0,43x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_2x_3 \quad (5)$$

Проводився вибір оптимального складу бетону жорсткого дорожнього покриття для автомобільних доріг II і III категорій (перший варіант пошуку). Дороги даних категорій є найбільш розповсюдженими в Україні та можуть розглядатися як основні об'єкти для використання бетонів на основі перероблених заповнювачів та відходів виробництва. Згідно до вимог ДБН В.2.3-4:2015 [23] та ДСТУ 8858:2019 [24] у якості

критеріїв обмеження використовувалися такі значення механічних характеристик бетону жорсткого дорожнього покриття:

- міцність на стиск $f_{cm} \geq 40 \text{ МПа}$ (клас В30, С25/30);
- міцність на розтяг при згині $f_{ctk} \geq 5 \text{ МПа}$ (клас Вbtb4,0);
- морозостійкість $\geq \text{F200}$;
- стираність $G \leq 0,50 \text{ г/см}^2$ (марка за стираністю G3).

У якості критерію оптимізації використовувалася собівартість виготовлення 1 м^3 бетонної суміші, яку необхідно мінімізувати.

Пошук оптимального складу бетону здійснювався покроковим скануванням полів наведених вище властивостей. Для кожного з 3-х варійованих факторів складу було обрано технологічно обґрунтований крок, з яким проводилася генерація відповідних координат точок в факторному просторі експерименту. Обґрунтування базується на реальних можливостях технологічного обладнання щодо дозування компонентів бетонної суміші при її приготуванні.

Для фактору X_1 приймався крок в 1 кг цементу на м^3 бетонної суміші, що дорівнювало заміні 0,5% цементу золою. З врахуванням того, що золою замінювалося до 20% цементу, тобто до 60 кг/м^3 , отримуємо 60 кроків по 0,0(3) в унормованому безрозмірному факторному просторі, що відповідає 61 рівню фактору x_1 від -1 до +1. Для фактору X_2 приймався крок в $0,05 \text{ кг/м}^3$ суперпластифікатору MC-PowerFlow 3200. Це 36 кроків по 0,0(5) в унормованому факторному просторі та відповідно 37 рівнів фактору x_2 . Для фактору X_3 приймався крок в $0,05 \text{ кг/м}^3$ поліпропіленової фібри. Це аналогічно кроку 1го фактору дає 60 кроків по 0,0(5) в унормованому факторному просторі та відповідно 61 рівень фактору x_3 . Прийняті кроки зміни варійованих факторів при скануванням полів властивостей бетону графічно відображені на рис.1.

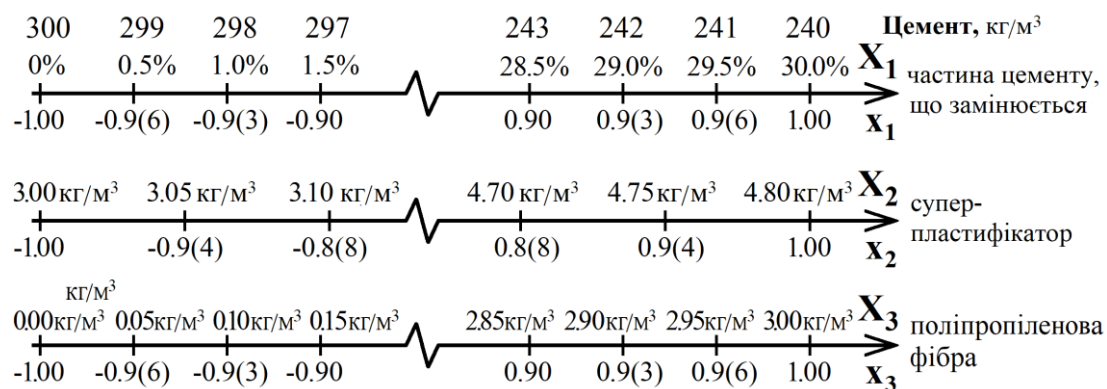


Рис. 1. Прийняті кроки зміни варійованих факторів при скануванням полів властивостей бетону

Таким чином, загальна кількість розрахункових точок (наборів координат) при покроковому скануванні полів властивостей бетону дорівнювала 137677 ($61 \times 36 \times 61$). У створеній в Microsoft Excel таблиці в кожній з цих точок за ЕС-моделями (1)-(5) були розраховані значення міцності на стиск f_{cm} , міцності на розтяг при згині f_{ctk} , морозостійкості F , стираності G та собівартості $Соб$. При розрахунку рівні f_{cm} , f_{ctk} , F та G автоматично порівнювалися з відповідними критеріями обмеження. При виконанні умови критерію логічна функція присвоювала відповідній клітинці таблиці значення «1», при невиконанні – «0» (рис.2). Надалі результати перевірок перемножилися і відповідно добуток був рівним «1» лише за умови, якщо всі критерії обмеження виконувалися. Це також дозволило автоматично визначити, який відсоток

факторного простору займає область припустимих рішень. В даному випадку він дорівнював 24,3%.

На завершальному етапі пошуку координати точки, яка відповідає оптимальному складу бетону, було проведено відсіювання всіх точок (наборів координат), які не забезпечували виконання одночасно всіх критеріїв обмеження. Надалі всі 33389 точки, що залишилися з початкового масиву у 137677 точок, були проранжовані за значенням показника собівартості, який визначався у відповідному стовпці таблиці (рис.3). Таким чином, найменшу собівартість 3511 грн/м³ мають бетони у точці з координатами $x_1 = 0,533, x_2 = 0, x_3 = -0,067$, що відповідає оптимальному складу.

	b0	b1	b2	b3	b11	b22	b33	b12	b13	b23	критерії обмеження
f_{cm}	53,17	-4,10	1,58	0,75	-6,11	0	1,41	0	1,62	0	f _{cm} не менш 40
f_{ctk}	5,092	-0,056	0,048	0,191	-0,168	-0,058	-0,063	0	0	-0,036	f _{ctk} не менш 5,0
F	198,6	5,0	20	20	0	-21,4	-21,4	-6,3	-6,3	6,3	F не менш 200
G	0,471	0,007	-0,005	-0,02	0,008	0,004	0,007	0,002	0	0,003	G не більше 0,5
Соб	3585,37	-95,77	150,35	344,06	-1,22	0	-0,46	-0,43	0	0	

розмір області припустимих рішень	Добуток усіх результатів перевірок	f_{cm}	f_{ctk}	F	G	Соб
24,3%		min 40,39	4,472	104,5	0,456	2993,94
33389		max 57,16	5,225	212,4	0,523	4174,29

всі умови	No	X ₁	X ₂	X ₃	значення показника у точці	f_{cm}	f_{ctk}	F	G	Соб	контроль умов
0	1	-1,000	-1,000	-1,000	51,868	4,584	104,5	0,513	3184,62	1	100% 52% 28% 93%
0	2	-1,000	-0,944	-1,000	51,955	4,595	107,9	0,512	3193,00	1	f _{cm} f _{ctk} F G
0	3	-1,000	-0,889	-1,000	52,043	4,606	111,2	0,511	3201,37	1	0 0 0 0
0	4	-1,000	-0,833	-1,000	52,130	4,616	114,3	0,510	3209,75	1	0 0 0 0
0	5	-1,000	-0,778	-1,000	52,218	4,626	117,4	0,509	3218,13	1	0 0 0 0
0	6	-1,000	-0,722	-1,000	52,305	4,635	120,3	0,508	3226,50	1	0 0 0 0
0	7	-1,000	-0,667	-1,000	52,393	4,644	123,0	0,507	3234,88	1	0 0 0 0
0	8	-1,000	-0,611	-1,000	52,480	4,653	125,7	0,507	3243,26	1	0 0 0 0
0	9	-1,000	-0,556	-1,000	52,568	4,661	128,2	0,506	3251,63	1	0 0 0 0

Рис. 2. Зовнішній вигляд таблиці Microsoft Excel, в якій реалізовано сканування полів властивостей бетону та порівняння розрахованих показників з відповідними критеріями обмеження. Перший варіант пошуку. Бетон жорсткого дорожнього покриття

Вміст компонентів у обраному складі бетону жорсткого дорожнього покриття (склад №1) та його розрахункові механічні характеристики та собівартість наведено у таблиці 1.

всі умови	No	X ₁	X ₂	X ₃	значення показника у точці	f_{cm}	f_{ctk}	F	G	Соб
1	104877	0,533	0,000	-0,067	49,143	5,001	200,0	0,478	3511,00	
1	102584	0,500	0,056	-0,100	49,537	5,005	200,0	0,478	3511,11	
1	102549	0,500	0,167	-0,133	49,671	5,003	200,5	0,479	3516,32	
1	104878	0,533	0,056	-0,067	49,231	5,004	200,9	0,478	3519,34	
1	102585	0,500	0,111	-0,100	49,625	5,007	200,7	0,478	3519,45	
1	100292	0,467	0,167	-0,133	50,012	5,010	200,4	0,478	3519,55	
1	107207	0,567	-0,056	0,000	48,796	5,003	200,4	0,478	3522,37	
1	104914	0,533	0,000	-0,033	49,192	5,008	200,7	0,478	3522,47	
1	102621	0,500	0,056	-0,067	49,582	5,012	200,7	0,478	3522,58	
1	100328	0,467	0,111	-0,100	49,964	5,015	200,5	0,478	3522,68	

Рис. 3. Пошук оптимального складу бетону (координат оптимального рішення) в таблиці Microsoft Excel ранжуванням стовпця, у якому розраховується значення критерію оптимізації (за умови виконання всіх висунутих критеріїв обмеження). Перший варіант пошуку. Бетон жорсткого дорожнього покриття

Надалі аналогічна описаній вище процедура пошуку оптимального складу бетону була реалізована при умові підвищення вимог щодо міцності бетону на стиск до 50 МПа (рівня критерію обмеження). Такі умови є більш притаманними для транспортних

споруд. Таким чином, при пошуку оптимального складу бетону для конструкцій транспортних споруд у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення механічних характеристик (другий варіант пошуку):

- міцність на стиск $f_{cm} \geq 50 \text{ МПа}$;
- міцність на розтяг при згині $f_{ctk} \geq 5 \text{ МПа}$;
- морозостійкість $\geq \text{F200}$;
- стираність $G \leq 0,50 \text{ г/см}^2$.

За таких умов відсоток факторного простору експерименту, який займає область припустимих рішень, складає 21,8%. Це природно менше, ніж при першій процедурі пошуку, завдяки більш високим вимогам щодо міцності на стиск.

Таблиця 1

Обрані оптимальні склади бетонів, їх механічні характеристики та собівартість

Номер обраного складу	Координати точки у факторному просторі експерименту	Склад бетону, кг/м ³	Розрахункові механічні характеристики та собівартість
№1	$x_1 = 0,533$ $x_2 = 0$ $x_3 = 0,067$	Цемент – 254 Зола – 107,3 Вторинний щебінь – 1085 Пісок – 736 Суперпластифікатор – 3,9 Фібра Vaumesh – 1,4 Вода – 133	Міцність на стиск 49,1 МПа; Міцність на розтяг при згині 5,00 МПа; Морозостійкість F200; Стираність 0,478 г/см ² ; Собівартість 3511,00 грн/м ³ .
№2	$x_1 = 0,467$ $x_2 = 0,167$ $x_3 = 0,133$	Цемент – 256 Зола – 102,7 Вторинний щебінь – 1085 Пісок – 740 Суперпластифікатор – 4,05 Фібра Vaumesh – 1,3 Вода – 132	Міцність на стиск 50,0 МПа; Міцність на розтяг при згині 5,01 МПа; Морозостійкість F200; Стираність 0,478 г/см ² ; Собівартість 3519,55 грн/м ³ .

На рис.4 наведено результат пошук оптимального складу бетону для конструкцій транспортних споруд (координати оптимального рішення) в таблиці Microsoft Excel, яка описана вище. Наведено завершальний етап розрахунків після відсіювання точок, які не забезпечували виконання критеріїв обмеження, та ранжування за собівартістю. Вміст компонентів у обраному складі бетону (склад №2) та його розрахункові механічні характеристики і собівартість наведено у таблиці 1.

8			Fly Ash	Plasticizer	Fiber	значення показника у точці				
9	всі умови	No	X ₁	X ₂	X ₃	f _{cm}	f _{ctk}	F	G	Соб
10	1	100292	0,467	0,167	-0,133	50,012	5,010	200,4	0,478	3519,55
11	1	98035	0,433	0,167	-0,133	50,340	5,017	200,2	0,478	3522,78
12	1	100257	0,467	0,278	-0,167	50,151	5,006	200,3	0,479	3524,76
13	1	98071	0,433	0,111	-0,100	50,290	5,021	200,4	0,477	3525,91
14	1	95778	0,400	0,167	-0,133	50,653	5,023	200,0	0,477	3526,01
15	1	100293	0,467	0,222	-0,133	50,100	5,012	200,8	0,478	3527,89
16	1	98000	0,433	0,278	-0,167	50,480	5,013	200,1	0,478	3527,99
17	1	98107	0,433	0,056	-0,067	50,243	5,026	200,4	0,477	3529,04
18	1	95814	0,400	0,111	-0,100	50,602	5,028	200,2	0,477	3529,14
19	1	100329	0,467	0,167	-0,100	50,052	5,017	201,1	0,477	3531,02
20	1	98036	0,433	0,222	-0,133	50,427	5,018	200,7	0,478	3531,12
21	1	98143	0,433	0,000	-0,033	50,199	5,030	200,1	0,476	3532,17
22	1	95850	0,400	0,056	-0,067	50,553	5,032	200,2	0,476	3532,27
23	1	93557	0,367	0,111	-0,100	50,900	5,034	200,1	0,476	3532,36

Рис. 4. Пошук оптимального складу бетону (координат оптимального рішення) в таблиці Microsoft Excel. Другий варіант пошуку. Бетон конструкцій транспортних споруд.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Слід зазначити, що обрані склади бетонів є оптимальними саме з позиції їх застосування в конструкціях жорстких дорожніх покриттів або транспортних споруд з урахуванням мінімізації собівартості в поточних середніх цінах на ринку. Так на собівартість розглянутих в даному дослідженні бетонів та відповідно рішення щодо обраних складів суттєво впливала кількість поліпропіленової фібри Vaumesh та суперпластифікатора MC-PowerFlow 3200, які є достатньо дорогими. Фактична вартість компонентів може суттєво змінюватися, зокрема в залежності від розташування виробничих потужностей, а в умовах руйнування значної кількості ТЕЦ в Україні може виникати дефіцит золи виносення, що вплине на ефективність використання даного відходу.

При висуванні інших вимог до механічних показників бетонів та критеріїв оптимальності оптимальний склад бетону буде іншим. Наприклад, в країнах Європейського Союзу при виробництві бетонів не менш важливим показником, ніж собівартість, є значення вуглецевого сліду як одного з основних екологічних впливів. Не менш важливим з екологічної точки зору є використання вторинного щебеню в складі бетону.

6 ВИСНОВКИ

Реалізація покрокового сканування полів властивостей дозволила швидко і з великою точністю знайти оптимальні склади бетонів для жорстких дорожніх покриттів і конструкцій транспортних споруд. За рахунок того, що крок зміни рівнів варійованих факторів при скануванні був технологічно обґрунтованим, знайдені склади відповідають технічним можливостям дозувального обладнання бетонних заводів.

Визначені склади бетонів на вторинному щебені забезпечують необхідний рівень міцності на стиск, міцності на розтяг при згині, морозостійкості та зносостійкості, що забезпечує необхідну довговічність матеріалу в типових для умов експлуатації дорожніх покриттів і транспортних споруд. При цьому визначені оптимальні склади мають мінімальну собівартість з урахуванням поточних ринкових цін та є ефективними з екологічної точки зору.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Мірошніченко В.В. Регіональні відмінності в рівнях ушкодження інфраструктури України внаслідок російської агресії. Наукові записки НаУКМА. Економічні науки, 2025. Т. 10, вип. 1. С. 146-152. <https://doi.org/10.18523/2519-4739.2025.10.1.146-152>
2. Skocek J., Ouzia A., Vargas Serrano E., Pato N. Recycled Sand and Aggregates for Structural Concrete: Toward the Industrial Production of High-Quality Recycled Materials with Low Water Absorption. Sustainability, 2024. 16. 814. <https://doi.org/10.3390/su16020814>
3. Bhardwaj A., Rankavat S. Treatment of Recycled Coarse Aggregate Using Hybrid Technique for Rigid Pavements Incorporating Fly Ash. Lecture Notes in Civil Engineering, 2025. 621. P. 59-74. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1984-9_6
4. Дворкін Л.Й. Ефективні золоті цементі, бетони та розчини. Рівне: НУВГП, 2022. 419 с.

5. Sanytsky M.A., Rusyn B.G., Kropyvnytskyi T.S., Trefler R. Yu. Low-carbon Nanomodified Rapid-hardening High-performance Concretes. *Materials Science*, 2025. 61. P. 23-27. <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00955-2>
6. Suryani F.M., Rizal S., Abdullah A., Isya M. Fly Ash Substitution in Lightweight Concrete for Rigid Pavement Construction on Low-Bearing-Capacity Soil. *Sustainability*, 2023. 15. 15239. <https://doi.org/10.3390/su152115239>
7. Mashaan N.S., Kibutu S., Dassanayake C., Ghodrati A. Sustainable Utilisation of Mining Waste in Road Construction: A Review. *Journal of Experimental and Theoretical Analyses*, 2025. 3. 19. <https://doi.org/10.3390/jeta3030019>
8. Kamplimath H., Urmil D. Mechanical Properties and Life Cycle Assessment of Sustainable Concrete Pavement Utilizing High Volume Fly Ash and Manufactured Sand. *Journal of Structural Design and Construction Practice*, 2026. 31 (1). <https://doi.org/10.1061/JSDCCC.SCENG-1869>
9. Kroviakov S., Finohenov O., Ihnatenko A. Determination of the Effect of the Amount of Polypropylene Fiber and Plasticizer on the Strength and Abrasion Resistance of Concretes for Rigid Pavement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025. 2 (6 (134)). P. 53-60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322590>
10. Wang L., Zhang H., Zhao B., Wang B., Zhao Q., Sun M. Experimental Investigation on Physical Properties of Concrete Containing Polypropylene Fiber and Water-Borne Epoxy for Pavement. *Coatings*, 2023. 13. 452. <https://doi.org/10.3390/coatings13020452>
11. Дворкін Л.Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів. К.: Кондор. 2020. 205 с.
12. Кровяков С.О., Ігнатенко А.В., Фіногенов О.І., Лапіна О.І. Оптимізація складу фібробетону жорсткого дорожнього покриття з використанням комплексу експериментально-статистичних моделей. *Дороги і мости*, 2025. Вип. 32. С. 113-123. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.32.113>
13. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одеса: Астропрінт, 2017. 168 с.
14. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К.: Вища школа, 1989. 327 с.
15. Li Z., Lum D., Gao X. Optimization of mixture proportions by statistical experimental design using response surface method - A review. *Journal of Building Engineering*, 2021. 36. 102101. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102101>
16. Гамеляк І.П., Шургая А.Г., Якименко Я.М., Чиженко Н.П. Математичні моделі властивостей високоміцних цементобетонів 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>
17. Теліцина Н.С., Квітка О.О., Шахновський А.М. Експериментально-статистичне моделювання складу сухих будівельних сумішей: визначення оптимальної частки модифікуючої добавки. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 2023. № 1(84). С.72-79. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.1.9>
18. Кровяков С.О., Ігнатенко А.В., Шестаков Л.Є., Заволока М.В. Пошук оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття з використанням експериментально-статистичних моделей. *Механіка та математичні методи*, 2024. Т. 6. № 1. С. 6-16. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-1-6-16>
19. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin A., Orešković M. Modelling the Influence of Composition on the Properties of Lightweight Plaster Mortar and Multicriteria Optimisation. *Materials*, 2023. 16(7). 2846. <https://doi.org/10.3390/ma16072846>
20. Lyashenko T.V., Antoniuk N.R. Multicriterial Search for Rational Solutions when Developing Building Composites. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2020, no. 79, P. 99-108. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-99-108>
21. Lyashenko T.V., Voznesensky V.A., Gavriuliuk V.P. Multicriterial Optimisation of Autoclaved Aerated Concrete Properties and Expenditure of Energy Resources. *Brittle Matrix Composites 9*. Woodhead Publishing: 2009, P. 219-226. <https://doi.org/10.1533/9781845697754.219>

22. Kryzhanovskiy V., Kroviakov S., Shymchenko P., Aksyonova I. Design of Recycled Aggregate Fiber-Reinforced Concrete for Road and Airfield Applications Using Polypropylene Fibers and Fly Ash. *Construction Materials*, 2026, 6(1), 2. <https://doi.org/10.3390/constrmater6010002>
23. 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.
24. ДСТУ 8858:2019. Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови. [Чинний від 2020-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2019. 16 с

References

1. Miroschnychenko, V.V. (2025). Regional differences in the levels of damage to Ukraine's infrastructure due to Russian aggression. *Scientific Papers NaUKMA. Economics*. 10 (1). 146–152 [in Ukraine]. <https://doi.org/10.18523/2519-4739.2025.10.1.146-152>
2. Skocek, J., Ouzia, A., Vargas Serrano, E., Pato, N. (2024). Recycled Sand and Aggregates for Structural Concrete: Toward the Industrial Production of High-Quality Recycled Materials with Low Water Absorption. *Sustainability*. 16. 814. <https://doi.org/10.3390/su16020814>
3. Bhardwaj, A., Rankavat, S. (2025). Treatment of Recycled Coarse Aggregate Using Hybrid Technique for Rigid Pavements Incorporating Fly Ash. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 621. 59–74. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1984-9_6
4. Dvorkin L.Y. (2022). Efektyvni zolovmisni tsementy, betony ta rozchyny [Effective ash-containing cements, concretes and mortars]. Rivne. NUVHP [in Ukraine].
5. Sanytsky, M.A., Rusyn, B.G., Kropyvnytskyi, T.S., Trefler, R.Yu. (2025). Low-carbon Nanomodified Rapid-hardening High-performance Concretes. *Materials Science*. 61. 23–27. <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00955-2>
6. Suryani, F.M., Rizal, S., Abdullah, A., Isya, M. (2023). Fly Ash Substitution in Lightweight Concrete for Rigid Pavement Construction on Low-Bearing-Capacity Soil. *Sustainability*. 15. 15239. <https://doi.org/10.3390/su152115239>
7. Mashaan, N.S., Kibutu, S., Dassanayake, C., Ghodrati, A. (2025). Sustainable Utilisation of Mining Waste in Road Construction: A Review. *Journal of Experimental and Theoretical Analyses*. 3. 19. <https://doi.org/10.3390/jeta3030019>
8. Kamplimath, H., Urmil, D. (2026). Mechanical Properties and Life Cycle Assessment of Sustainable Concrete Pavement Utilizing High Volume Fly Ash and Manufactured Sand. *Journal of Structural Design and Construction Practice*. 31 (1). <https://doi.org/10.1061/JSDCCC.SCENG-1869>
9. Kroviakov, S., Finohenov, O., Ihnatenko, A. (2025). Determination of the Effect of the Amount of Polypropylene Fiber and Plasticizer on the Strength and Abrasion Resistance of Concretes for Rigid Pavement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2 (6 (134)). 53–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322590>
10. Wang, L., Zhang, H., Zhao, B., Wang, B., Zhao, Q., Sun, M. (2023). Experimental Investigation on Physical Properties of Concrete Containing Polypropylene Fiber and Water-Borne Epoxy for Pavement. *Coatings*. 13. 452. <https://doi.org/10.3390/coatings13020452>
11. Dvorkin, L.Y. (2022). Eksperymental'no-statystychnye modelyuvannya pry proektuvanni skladiv betoniv [Experimental and statistical modelling in the design of concrete compositions]. Kyiv. Kondor [in Ukraine].
12. Kroviakov, S.O., Ignatenko, A.V., Finogenov, O.I., Lapina, O.I. (2025). Optyimizatsiya skladu fibrobetonu zhorstkoho dorozhn'oho pokryvu z vykorystannyam kompleksu eksperymental'no-statystychnykh modeley [Optimisation of the composition of fibre-reinforced concrete for rigid pavement using a set of experimental-statistical models]. *Roads and Bridges*. 32. 113–123 [in Ukraine]. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.32.113>
13. Lyashenko, T.V., Voznesenskiy, V.A. (2017). Metodologiya retsepturno-tekhnologicheskikh poley v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii [Composition-process fields methodology in computational building materials science]. Odesa. Astroprint [in Russian].

14. Voznesensky, V.A., Lyashenko, T.V., Ogarkov, B.L. (1989). Chislennyye metody resheniya stroitel'no-tehnologicheskikh zadach na EVM [Numerical methods for solving construction and technological problems on a computer]. Kyiv. Vishcha shkola [in Russian].
15. Li, Z., Lum, D., Gao, X. (2021). Optimization of mixture proportions by statistical experimental design using response surface method - A review. Journal of Building Engineering. 36. 102101. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102101>
16. Gameliak, I.P., Shurgaya, A.G., Jakymenko, J.M., Chyzhenko, N.P. (2017). Matematychni modeli vlastyivostey vysokomitsnykh tsementobetoniv dlya dorozhn'oho budivnytstva [Mathematical models of the properties of high-strength cement-concrete for road construction]. Collected scientific works of Ukrainian state university of railway transport. 169. 103–110 [in Ukraine]. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084>
17. Telitsyna, N.E., Kvitka O.O., Shakhnovsky, A.M. (2023). Eksperymental'no-statystychny modelyuvannya skladu sukhykh budivel'nykh sumishey: vyznachennya optimal'noyi chastky modyfikuyuchoyi dobavky [Experimental statistical modeling of dry construction mixtures formulation: optimal content of the modifying admixture determination]. Visnyk of Kherson National Technical University. 1(84). 72–79 [in Ukraine]. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.1.9>
18. Kroviakov, S.O., Ihnatenko, A.V., Shestakova, L.Ye., Zavaloka, M.V. (2024). Poshuk optimal'nykh skladiv fibrobetoniv zhorstkoho drozhn'oho pokryttya z vykorystannyam eksperymental'no-statystychnykh modeley [Search for optimal compositions of fiber-reinforced concretes for rigid screeds using experimental and statistical models]. Mechanics and mathematical methods. 6 (1). 6–16 [in Ukraine]. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-1-6-16>
19. Moskalova, K., Lyashenko, T., Aniskin, A., Orešković, M. (2023). Modelling the Influence of Composition on the Properties of Lightweight Plaster Mortar and Multicriteria Optimisation. Materials. 16(7). 2846. <https://doi.org/10.3390/ma16072846>
20. Lyashenko, T.V., Antoniuk, N.R. (2020). Multicriterial Search for Rational Solutions when Developing Building Composites. Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. 79. 99–108. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-99-108>
21. Lyashenko, T.V., Voznesensky, V.A., Gavriiliuk, V.P. (2009). Multicriterial Optimisation of Autoclaved Aerated Concrete Properties and Expenditure of Energy Resources. Brittle Matrix Composites 9. Woodhead Publishing. 219–226. <https://doi.org/10.1533/9781845697754.219>
22. Kryzhanovskiy, V., Kroviakov, S., Shymchenko, P., Aksonova, I. (2026). Design of Recycled Aggregate Fiber-Reinforced Concrete for Road and Airfield Applications Using Polypropylene Fibers and Fly Ash. Construction Materials. 6(1), 2. <https://doi.org/10.3390/constrmater6010002>
23. 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]. Ministry of Regional Development, Construction, Housing and Communal Services of Ukraine, 2015 [in Ukraine].
24. DSTU 8858:2019. Sumishi tsementobetonni dorozhni ta tsementobeton dorozhniy. Tekhnichni umovy. [Cement-concrete road mixtures and cement-concrete road. Technical conditions]. Kharkiv National Automobile and Road University, 2019 [in Ukraine].

Стаття надійшла до редакції 25.12.2025

Стаття прийнята до друку 18.02.2026

Дата публікації статті 26.03.2026

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

Шимченко Павло Володимирович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
аспірант

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

1210867@gmail.com,

ORCID: 0000-0002-1656-9432

Для посилань:

Кровяков С. О., Шимченко П. В. Пошук оптимальних складів бетонів дорожніх покриттів і транспортних споруд з використанням вторинного щебеню покроковим скануванням полів властивостей. Механіка та математичні методи, 2026. Т. VIII. № 1. С. 41–53.

For references:

S. Kroviakov, P. Shymchenko. (2026). Search for optimal compositions of concrete for rigid pavement and transport structures using recycled aggregate by step-by-step scanning of property fields. Mechanics and Mathematical Methods. VIII (1). 41–53.

Пошук оптимальних складів бетонів дорожніх покриттів і транспортних споруд з використанням вторинного щебеню покроковим скануванням полів властивостей © 2026 by Кровяков С. О., Шимченко П. В. is licensed under CC BY 4.0