

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Кінтя Лючія

УДК 691.327

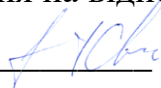
ДИСЕРТАЦІЯ
БЕТОНИ ПІДВИЩЕНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ
ДЛЯ ЖОРСТКИХ ПОКРИТТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань – 19, Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ Кінтя Л.

Науковий керівник:

Мішутін Андрій Володимирович, доктор технічних наук, професор

Одеса – 2021

АНОТАЦІЯ

Кінтя Л. Бетони підвищеної довговічності для жорстких покриттів автомобільних доріг.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Одеська державна академія будівництва та архітектури – Одеса, 2021.

Метою роботи є розробка бетонів жорстких дорожніх покриттів з підвищеною довговічністю та міцністю, зокрема ранньою, за рахунок використання фібри, суперпластифікатору з прискорювачем твердіння та активної мінеральної добавки пуцоланового типу.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, її актуальність, показаний зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета роботи і задачі досліджень, наведені положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів.

У першому розділі проаналізовано досвід будівництва і експлуатації доріг з жорсткими дорожніми покриттями, а також методи управління структурою і властивостями цементобетонів дорожніх покриттів для забезпечення їх довговічності в типових умовах експлуатації. Жорсткі дорожні покриття мають багато переваг перед нежорсткими асфальтобетонними, насамперед це більша довговічність та відсутність колійності. В середньому через 9..12 років сумарні витрати на будівництво і експлуатацію доріг з асфальтобетонним і цементобетонним покриттям стають рівними, а в подальшому експлуатація дороги з жорстким покриттям стає вигіднішою. Згідно прийнятої Укравтодором програми за 2021–2025 роки в Україні має бути побудовано 2900 км доріг з використанням жорстких покриттів. Показано, що отримання бетонів з високою міцністю та довговічністю при забезпеченні достатньої рухомості суміші можливе при використанні ефективних модифікаторів, насамперед пластифікаторів полікарбосилатного типу. Досягнути комплексного впливу на структуру та властивості бетону, зокрема на ранню міцність, дозволяють

комплексні модифікатори, що включають прискорювачі твердіння і пуцолани. Обґрунтовано, що ефективним методом впливу на структуру бетонів дорожніх покриттів, який дозволяє підвищити їх міцність при згині, морозостійкість, і зносостійкість, є використання стійкої до корозії фібри.

За результатами проведеного аналізу сформульовано *робочу гіпотезу* роботи. Існуючі методи і критерії оцінки довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів враховують окремо дії навантаження від транспортних засобів, або зміни температур, або характеристик бетону. Врахування спільного впливу модифікації бетону, зміни температур та вологості, а також навантаження від транспортних засобів дозволять оцінити якість цементобетонного покриття та прогнозувати заданий строк експлуатації. Улаштування цементобетонного покриття з покращеними властивостями за рахунок використання комплексних модифікаторів (пластифікатор-прискорювач твердіння), метакаоліну (активної добавки) і дисперсного армування стійкою до корозії поліпропіленовою фіброю дозволить поліпшити структуру і фізико-механічні характеристики модифікованого бетону, підвищити його експлуатаційні властивості та довговічність, що буде впливати на зменшення грошових витрат при утриманні цементобетонного покриття, а також експлуатації автодоріг в цілому.

У *другому розділі* описано методику проведення досліджень і наведено характеристику використаних матеріалів. У якості модифікаторів використовувалися: добавка комплексної дії полікарбоксилатного типу Coral ExpertSuid 5 (гіперпластифікатор у поєднанні з прискорювачем твердіння) і метакаолін (продукт випалу збагачених каолінових глин). У якості дисперсної арматури використовувалася поліпропіленова фібра «MicroArm» з довжиною волокон 12 мм і діаметром 20 мкм.

За 18-ти точковим оптимальним планом проводився 4-х факторний експеримент, в якому варіювалися наступні фактори складу бетону:

- X_1 , кількість портландцементу ПЦ II/A-III-500, від 400 до 500 кг/м³;
- X_2 , кількість поліпропіленової фібри, від 0 до 2 кг/м³;
- X_3 , кількість метакаоліну, від 0 до 30 кг/м³;

- X_4 , кількість добавки Coral ExpertSuid-5, від 0,6 до 1% від маси цементу.

У якості заповнювачів для бетону використовувався щебінь фракції 5-10 мм і кварцовий пісок з модулем крупності 2,7.

Аналіз властивостей бетонів і фібробетонів проводився з використанням експериментально-статистичних (ЕС) моделей.

У *третьому розділі* проаналізовано вплив варійованих факторів складу на В/Ц суміші та міцність модифікованих бетонів і фібробетонів у різному віці.

Всі суміші досліджених бетонів і фібробетонів мали рівну рухомість R_2 , відповідно їх В/Ц залежало від складу. Встановлено, що В/Ц бетонних сумішей рівної рухомості варіювалося від 0,332 до 0,515. Введення поліпропіленової фібри і метакаоліну викликає необхідність підвищення В/Ц для збереження рухомості суміші. Підвищення кількості добавки Coral ExpertSuid-5 з 0,6 до 0,9..1% відчутно знижує В/Ц суміші.

У віці 3-х діб міцність на стиск досліджених бетонів варіювалася від 27,3 до 50,5 МПа, у віці 7-ми діб – від 30,8 до 55,2 МПа, у віці 28-ми діб – від 41,3 до 71,9 МПа і у віці 180-ти діб – від 48,3 до 80,7 МПа. При підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 до 0,9..1% міцність бетонів і фібробетонів на стиск зростає на 7-9 МПа, при цьому позитивний вплив добавки проявляється вже у віці 3-х і 7-ми діб. За рахунок введення метакаоліну у кількості 15-20 кг/м³ міцність бетонів на стиск в залежності від кількості цементу і віку підвищується на 5-7 МПа. При використанні раціональної кількості добавки Coral ExpertSuid-5 (0,8..0,9% від маси цементу) і метакаоліну (15..20 кг/м³) міцність бетонів на стиск підвищується на 15-16 МПа, при цьому вже у віці 3-х діб міцність модифікованих бетонів складає 42..50 МПа, що на 11..12 МПа більше міцності бетонів з мінімальною кількістю добавки.

Міцність на розтяг при згині досліджених бетонів у віці 3-х діб складала від 5,35 до 6,96 МПа, у віці 7-ми діб – від 6,25 до 8,01 МПа, у віці 28-ми діб – від 6,97 до 9,27 МПа і у віці 180-ти діб – від 7,49 до 10,13 МПа. За рахунок дисперсного армування міцність бетонів дорожніх покриттів на розтяг при згині підвищується на 0,5..0,9 МПа. При використанні комплексної модифікації

та дисперсного армування міцність бетонів на розтяг при згині підвищується на 0,9..1,0 МПа у віці 3-х діб, на 1,0..1,3 МПа у віці 7-ми діб, на 1,2..1,4 МПа у віці 28-ми діб і на 1,3..1,6 МПа у віці 180-ти діб. Міцність модифікованих бетонів на розтяг при згині у віці 3-х діб складає 75..80% від міцності даних бетонів у 28-ми денному віці. Висока міцність на стиск та на розтяг при згині модифікованих фібробетонів дозволяє використовувати їх в дорожніх покриттях доріг з найбільшим навантаження. Висока рання міцність даних бетонів дає можливість розпочинати експлуатацію доріг з цементобетонними покриттями у більш короткі терміни та полегшує виконання необхідних подальших технологічних операцій при будівництві доріг.

Також завдяки аналізу залишків від кореляційної лінійної функції впливу Ц/В на міцність була оцінена роль в структуроутворенні бетонів і фібробетонів варійованих факторів складу поза їх зв'язком з водопотребою сумішей рівної рухомості. Обчислювальний експеримент дозволив отримати дані, що недоступні при використанні лише загальноприйнятих методик аналізу результатів планованого експерименту.

У *четвертому розділі* проаналізована довговічність і структура розроблених модифікованих бетонів і фібробетонів. Встановлено, що за рахунок дисперсного армування поліпропіленовою фіброю морозостійкість бетонів жорстких дорожніх покриттів зростає на 50 циклів і більше. Аналогічне зростання рівня F досягається при підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 до 0,8..0,9% від маси цементу. Модифіковані раціональною кількістю добавки і метакаоліну фібробетони жорстких дорожніх покриттів в залежності від кількості портландцементу у складі мають морозостійкість від F350 до F450 (аналогічно рівню F150 для «Бетонів дорожніх і аеродромних покриттів» згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96), що забезпечує їх достатню довговічність в умовах багаторазового заморожування і відтаювання.

Також встановлено, що за рахунок введення поліпропіленової фібри стиранність досліджених бетонів знижується на 22..35% (0,11..0,16 г/см²). При

підвищенні кількості портландцементу до 500 кг/м^3 стиранність бетону знижується на $0,07..0,10 \text{ г/см}^2$. Модифіковані фібробетони при використанні раціональної кількості поліпропіленової фібри і добавки Coral ExpertSuid-5 мають стиранність на рівні $0,30..0,35 \text{ г/см}^2$, що забезпечує виску зносостійкість дорожнього покриття та відповідно його довговічність в умовах інтенсивного впливу автотранспорту.

Аналіз впливу варійованих факторів на водонепроникність показав, що за рахунок використання комплексної модифікації раціональною кількістю добавки полікарбонатного типу Coral ExpertSuid-5 ($0,8..0,9\%$) і метакаоліна ($16..18 \text{ кг/м}^3$) досліджені бетони і фібробетони мають в залежності від кількості в'язучого водонепроникність від W10 до W14, що забезпечує високу стійкість жорстких дорожніх покриттів до дії агресивних речовин. Кількість поліпропіленової фібри несуттєво впливає на рівень W бетонів.

Аналіз відкритої пористості бетонів і фібробетонів показав, що найбільш суттєво на цей структурний показник впливає кількість полікарбонатної добавки Coral ExpertSuid-5. При підвищенні кількості добавки з $0,6\%$ до $0,9..1\%$ пористість знижується на $0,8..0,9\%$. При застосуванні $1,5..2 \text{ кг/м}^3$ поліпропіленової фібри відкрита пористість бетонів підвищується в середньому на $0,4\%$. За рахунок використання раціональної кількості полікарбонатної добавки Coral ExpertSuid-5 ($0,8..0,9\%$) і метакаоліну ($15..20 \text{ кг/м}^3$) незалежно від кількості в'язучого і дисперсної арматури відкрита пористість бетонів жорстких дорожніх покриттів знаходиться в межах $4..4,5\%$.

Рентгенофазовий аналіз структури досліджених бетонів і фібробетонів підтвердив ефективність впливу використаних модифікаторів, зокрема позитивну роль метакаоліну як активної пуцолани. Про це свідчить зменшення рефлексів Ca(OH)_2 в 1,5 рази з утворенням гідросилікатів кальцію та гексагональних гідроалюмінатів кальцію типу C_4AH_{13} .

Встановлено, що незалежно від кількості в'язучого у складі найменші значення коефіцієнту технологічної пошкоженості мають фібробетони з кількістю фібри $1..1,2 \text{ кг/м}^3$ і метакаоліну $14..18 \text{ кг/м}^3$, що можна пояснити

особливістю впливу даних факторів на формування і розвиток технологічних тріщин та внутрішніх поверхонь розділу.

Проведений мікроскопічний аналіз структури показав, що пори в піщано-цементній матриці (розчинні частини) бетонів і фібробетонів мають переважно незначні розміри і рівномірно розподілені у об'ємі, цементно-піщана матриця щільно прилягає до зерен крупного заповнювача а волока фібри рівномірно розподілені у структурі фібробетонів і якісно защемлені цементно-піщаною матрицею і крупним заповнювачем.

У *п'ятому розділі* описано вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів і впровадження результатів досліджень.

З використанням комплексу отриманих ЕС-моделей обрано оптимальні склади фібробетонів жорстких дорожніх покриттів класів С30/35 ($f_{ck,cube} \geq 50$ МПа, $f_{ctk} \geq 8$ МПа, морозостійкість $\geq F350$, $G \leq 0,40$ г/см², $f_{ck,cube.3} \geq 35$ МПа) і С32/40 ($f_{ck,cube} \geq 55$ МПа, $f_{ctk} \geq 8,5$ МПа, морозостійкість $\geq F400$, $G \leq 0,35$ г/см², $f_{ck,cube.3} \geq 35$ МПа). Обрані з врахуванням собівартості склади забезпечують необхідну міцність фібробетонів при підвищеній в типових умовах експлуатації довговічності та високому рівні ранньої міцності.

Розроблено «Регламент з технології приготування і застосування модифікованого бетону для покриттів автодоріг із застосуванням поліпропіленової фібри», який був затверджений у Одеському дочірньому підприємстві "Облавтодор" державної акціонерної компанії «Автомобільні дороги України».

Результати досліджень використовуються в освітньому процесі в Одеській державній академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів спеціальності 192 - Будівництво та цивільна інженерія за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми та транспортні системи».

Ключові слова: дорожнє покриття, довговічність, морозостійкість, зносостійкість, фібробетон, поліпропіленова фібра, суперпластифікатор, прискорювач твердіння, метакаолін.

ABSTRACT

Chintea L. Concretes with the increased durability for rigid road pavements.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Specialty 192 – Construction and Civil Engineering. – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odessa, 2021.

The aim of the work is to develop the concretes for rigid pavements with increased durability and strength, due to the use of fiber, super-plasticizing admixture with hardening accelerator and active mineral additive of pozzolanic type.

The introduction substantiates the choice of the research topic, its relevance. The links of the work with scientific programs, plans, topics are showed; the purpose of the work and research tasks are formulated; the scientific novelty and practical significance of the results are given.

The *first part* analyzes the experience of construction and road usage with rigid pavements, as well as the methods for structure managing and the properties of cement-concrete pavements to ensure their durability in typical operating conditions. Rigid pavements have many advantages over non-rigid bituminous-concrete ones, first of all this is greater durability and lack of wheel track. On average, in 9..12 years, the total costs of construction and operation of roads with bituminous-concrete and cement-concrete pavement become equal, and in the future the operation of the road with rigid pavement becomes more profitable. According to the program established by Ukravtodor during 2021–2025, 2.900 km of roads with rigid pavements should be built in Ukraine. It is shown that obtaining the concretes with high strength and durability, while ensuring sufficient mobility of the mixture, is possible with the use of effective modifiers, especially polycarboxylate plasticizers. The complex modifiers, including hardening accelerators and pozzolans, allow to get the comprehensive impact on the structure and the properties of concrete, particularly the eager strength. It is substantiated that the efficient important method on the structure of concrete pavements, which allows to increase their flexural strength, frost resistance, and hardness, is the use of corrosion-resistant fiber.

Based on the results of the analysis, the *working hypothesis* of the work is formulated. Existing methods and criteria for assessing the durability of rigid pavements take into account separately the load action of vehicles, temperature changes, or the characteristics of concrete. Taking into account the combined influence of concrete modification, temperature and humidity changes, as well as the vehicle load will allow to assess the quality of cement-concrete pavement and predict the specified time frame. Spreading of cement-concrete pavement with improved properties due to the use of complex modifiers (plasticizer – hardening accelerator), metakaolin (active additive) and dispersed reinforcement with corrosion-resistant polypropylene fiber will improve the structure and physical and mechanical characteristics of modified concrete, increase its properties and durability. So it will reduce the maintenance costs of cement-concrete pavement, as well as road operation in general.

There are the research methodology and the characteristics of used materials in the *second part*. The polycarboxylate type Coral ExpertSuid 5 admixture of complex action (hyper-plasticizer in combination with a hardening accelerator) and metakaolin (roasted product of rich kaolin clays) was used as the modifiers. Polypropylene fiber “MicroArm” with a fiber length 12 mm and a diameter 20 μm was used as dispersed reinforcement.

According to the 18-point optimal plan 4-factor experiment was carried out, where the following factors of concrete composition varied:

- X_1 , the amount of Portland cement PC II/A-III-500, from 400 to 500 kg/m^3 ;
- X_2 , the amount of polypropylene fiber, from 0 to 2 kg/m^3 ;
- X_3 , the amount of metakaolin, from 0 to 30 kg/m^3 ;
- X_4 , the amount of Coral ExpertSuid-5 admixture, from 0.6 to 1% from the cement weight.

Crushed stone (the fraction 5-10 mm) and quartz sand (fineness modulus 2.7) were used as the aggregates for concrete.

Property analysis of concrete and fiber concrete was performed using experimental-statistical (ES) models.

The influence of variable composition factors on the W/C mixtures and the strength of modified concretes and fibroconcretes at different ages were analyzed in the *third part*.

All the mixtures of tested concretes and fibroconcretes had equal mobility P2, respectively, their W/C depended on the composition. W/C of concrete mixtures with equal mobility was found to vary from 0,332 to 0,515. The introduction of polypropylene fiber and metakaolin causes to increase W/C to maintain the mobility of the mixture. Increasing the amount of Coral ExpertSuid-5 from 0.6 to 0.9..1% significantly reduces W/C of the mixture.

At the age of 3 days the compressive strength of tested concretes varied from 27.3 to 50.5 MPa, at the age of 7 days it was from 30.8 to 55.2 MPa, at the age of 28 days it was from 41.3 to 71.9 MPa and at the age of 180 days – from 48.3 to 80.7 MPa. When increasing the amount of Coral ExpertSuid-5 admixture of complex action to 0.9-1%, the compressive strength of concrete and fiber concrete increases by 7-9 MPa, while the positive effect of the admixture is at the age of 3 and 7 days. Due to the addition of metakaolin in the quantity of 15..20 kg/m³, the compressive strength of concrete, depending on the amount of cement and age, increases by 5..7 MPa. When using a reasonable amount of Coral ExpertSuid-5 admixture (0.8..0.9% from cement weight) and metakaolin (15..20 kg/m³) the compressive strength of concrete increases by 15..16 MPa, at the same time at the age of 3 days the strength of modified concretes is 42..50 MPa, which is 11..12 MPa more than the strength of concretes with a minimum amount of admixtures.

The tensile strength in bending of tested concretes at the age of 3 days were from 5.35 to 6.96 MPa, at the age of 7 days it was from 6.25 to 8.01 MPa, at the age of 28 days – from 6.97 to 9.27 MPa and at the age of 180 days – from 7.49 to 10.13 MPa. Due to disperse reinforcement, the tensile strength of concrete pavements increases by 0.5..0.9 MPa. When using a complex modification and dispersed reinforcement, the tensile strength of concrete in bending increases by 0.9..1.0 MPa at the age of 3 days, by 1.0..1.3 MPa at the age of 7 days, by 1.2..1.4 MPa at the age of 28 days and 1.3..1.6 MPa at the age of 180 days. The tensile strength of modified

concretes at bending at the age of 3 days is 75..80% of the strength of these concretes at the age of 28 days. High compressive and tensile strength in bending of modified fiberconcrete allows to use them in road pavement with the most heavy load. The high early strength of these concretes makes it possible to start the operation of the roads with cement-concrete pavements within a shorter period of time and facilitates the implementation of the necessary technological actions during the road construction.

Also, due to the analysis of the residues from the correlation linear function of the C/W influence on the strength, the role of varied composition factors outside their connection with water consumption of the mixtures with equal mobility in the structure formation of concretes and fibroconcretes was evaluated. The computational experiment allowed to obtain the data, which are not available when using only conventional methods of result analysis of the planned experiment.

In the *fourth part* the durability and the structure of the developed modified concretes and fibroconcretes are analyzed. It is established that due to disperse reinforcement with polypropylene fiber the concrete frost resistance of rigid pavements increases by 50 cycles and more. A similar increasing of F level is achieved by increasing Coral ExpertSuid 5 admixture amount of complex action to 0.8-0.9% from cement weight. Modified by a reasonable amount of additives and metakaolin the fibroconcretes of rigid pavements, depending on the amount of Portland cement in the composition, have the frost resistance from F350 to F450 (similar to F150 level for “Concretes for road and airfield pavements” according to DSTU B V. 2.7-49-96), which have sufficient durability in the conditions of multiple freezing and defrosting.

It was also established that due to adding of polypropylene fiber the wearing capacity of tested concretes reduces by 22..35% (0.11..0.16 g/cm²). When increasing the quantity of Portland cement to 500 kg/m³, the wearing capacity of concrete decreases by 0.07..0.10 g/cm². Modified fibroconcretes, using a reasonable amount of polypropylene fiber and Coral ExpertSuid-5 admixture, have the wearing capacity at

the level $0.30..0.35 \text{ g/cm}^2$, which provides high wear resistance of the road pavement and, accordingly, its durability in the condition of busy traffic.

Analysis of the influence of variable factors on water resistance showed that due to the use of a complex modification of a reasonable amount of polycarboxylate type Coral ExpertSuid-5 admixture (0.8..0.9%) and metakaolin ($16..18 \text{ kg/m}^3$) the concretes and fibroconcretes have waterproofing from W10 to W14 according to binder quantity, which provides high resistance of rigid pavements to aggressive substances. The amount of polypropylene fiber has a negligible influence on W level of concrete.

Analysis of the open porosity of concrete and fiber concrete showed that the structural indicator is most significantly affected by the amount of polycarboxylate Coral ExpertSuid-5 admixture. When increasing the amount of admixture from 0.6% to 0.9..1%, the porosity decreases by 0.8..0.9%. When using $1.5..2 \text{ kg/m}^3$ of polypropylene fiber, the open porosity of concrete increases by 0.4%. Due to the use of a reasonable amount of polycarboxylate Coral ExpertSuid-5 admixture (0.8..0.9%) and metakaolin ($15..20 \text{ kg/m}^3$), regardless of the amount of binder and dispersed reinforcement, the open porosity of concrete pavements is within 4..4.5%.

X-ray phase analysis of the structure of tested concretes and fibroconcretes confirmed the effectiveness of the modifiers, in particular the positive role of metakaolin as an active pozzolana. There is decreasing of Ca(OH)_2 reflexes by 1.5 times with the formation of calcium hydrosilicates and hexagonal calcium hydroaluminates of C_4AH_{13} type.

Regardless of binder amount in the composition, the fibroconcretes with the fiber amount of $1..1.2 \text{ kg/m}^3$ and metakaolin $14..18 \text{ kg/m}^3$ have the lowest values of the technological damage coefficient, which can be explained by the influence of these factors on the formation and development of technological cracks and internal surfaces of the section.

The microscopic analysis of the structure showed that the pores in the sand-cement matrix (soluble part) of concrete and fiber concrete are mostly small size and normally distributed in the quantity, the cement-sand matrix is close to the grains of

coarse aggregate. Fiber is normally distributed in the structure of fibroconcretes and qualitatively clamped by cement-sand matrix and coarse aggregate.

The *fifth part* describes the selection of the optimal compositions of fiberconcretes of rigid pavements and the implementation of research results.

Using a set of obtained EC-models, the optimal compositions of fiberconcretes for rigid pavements of C30/35 classes ($f_{ck.cube} \geq 50$ MPa, $f_{ctk} \geq 8$ MPa, frost resistance $\geq F350$, $G \leq 0,40$ g/sm², $f_{ck.cube.3} \geq 35$ MPa) and C32/40 ($f_{ck.cube} \geq 55$ MPa, $f_{ctk} \geq 8,5$ MPa, frost resistance $\geq F400$, $G \leq 0,35$ g/sm², $f_{ck.cube.3} \geq 35$ MPa) were chosen. The compositions, selected taking into account the prime cost, provide necessary durability of fibroconcretes at the increased durability in typical operating conditions and high level of early durability.

“Technological specifications for preparation and application of modified concrete for road pavements with the use of polypropylene fiber” were developed which was approved by the Odessa subsidiary enterprise “Oblavtodor” of the state incorporated company “Roads of Ukraine”.

The research results are used in the educational process at the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture in the preparation of master students, specialty 192 – Construction and Civil Engineering according to the educational-professional program “Roads and airfields and transport systems”.

Key words: pavement, durability, frost resistance, wear resistance, fiberconcrete, polypropylene fiber, superplasticizer, hardening accelerator, metakaolin.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Мішутін А.В., Кінтя Л. Міцність фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у різному віці. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2019, №77, С. 135-141. doi:10.31650/2415-377X-2019-77-135-141

2. Mishutin A.V., Chintea L. The effect of modified additives on strength and frost resistance in fibrous concrete of rigid road pavements. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2020, №80, С. 64-74. doi:10.31650/2415-377X-2020-80-68-74

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

3. Mishutin A.V., Zavoloka M.V., Chintia L. Management of cement-concrete road pavement structure. Journal of Engineering Science Vol. XXVI, no. 1 (2019), pp. 91-95. doi:10.5281/zenodo.2649980

4. Mishutin A., Kos Z., Grynyova I., Chintea L. Durability of modified fiber concrete for rigid pavements. Croatian regional development journal, 2021, Vol. 2, No. 1, pp.35-46, ISSN 2718-4978 https://www.crdj.eu/wp-content/uploads/2021/03/03_CRDJ_vol2_no1_2021_pp_35-46.pdf

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Мішутін А.В., Кінтя Л. Дослідження модифікованих фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез доповідей III міжнародної конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд». Одеса: ОДАБА, 2019, С. 106.

6. Мішутін А.В., Кінтя Л., Кровяков С.О. Вплив складу бетону жорсткого дорожнього покриття на його ранню міцність. Матеріали міжнародного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів», Одеса: ОДАБА, 2019. С.118-120

7. Мішутін А.В., Кінтя Л. Фібробетони жорстких дорожніх покриттів з підвищеною ранньою міцністю. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво». Одеса: ОДАБА, 2020, С.63-65

8. Мішутін А.В., Кінтя Л. Міцність і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез доповідей 76-ї конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2020, С.233

9. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Кінтя Л. Врахування зміни Ц/В при оцінці впливу складу модифікованих бетонів жорстких дорожніх покриттів на їх міцність. Матеріали міжнародного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів». Одеса: ОДАБА, 2020, С.86-90.

10. Мішутін А.В., Кінтя Л. Бетони і фібробетони жорстких дорожніх покриттів з підвищеною міцністю і довговічністю. Збірник тез доповідей III всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси». Одеса: ОДАБА, 2020, С.164.

11. Мішутін А.В., Кінтя Л. Фібробетони жорстких дорожніх покриттів з високою довговічністю та ранньою міцністю. Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» Одеса: ОДАБА, 2021, С.61-64.

ЗМІСТ

Анотація	2
Вступ.....	18
Розділ 1 Склад, властивості та досвід експлуатації	
бетонів жорстких дорожніх покриттів	23
1.1 Досвід будівництва і експлуатації жорстких дорожніх покриттів	23
1.2 Використання модифікаторів як метод керування структурою і властивостями бетонів дорожніх покриттів	30
1.3 Вплив дисперсного армування на властивості бетонів жорстких дорожніх покриттів.....	37
1.4 Робоча гіпотеза, мета і завдання роботи.....	43
Розділ 2 Характеристика використаних матеріалів і методика	
проведення досліджень.....	46
2.1 Характеристика використаних в дослідженнях матеріалів	46
2.2 Методика досліджень фізико-механічних властивостей і структури бетонів жорстких дорожніх покриттів	49
2.3 План проведених досліджень і варійовані в експерименті фактори.....	52
Висновки за 2-м розділом.....	55
Розділ 3 Міцність модифікованих бетонів і фібробетонів	
в різному віці	56
3.1 Вплив складу бетону на В/Ц сумішей рівної рухомості	56
3.2 Міцність при стиску досліджених бетонів у різному віці	58
3.3 Міцність досліджених бетонів на розтяг при згині у різному віці	69
3.4 Врахування зміни Ц/В суміші при оцінці впливу складу модифікованого бетону на його міцність	80
Висновки за 3-м розділом.....	85
Розділ 4 Довговічність і структура	
модифікованих бетонів і фібробетонів	87
4.1 Вплив складу бетонів і фібробетонів на їх морозостійкість	88

4.2 Зносостійкість і водонепроникність бетонів жорстких дорожніх покриттів.....	93
4.3 Дослідження водопоглинання та середньої густини бетонів і фібробетонів.....	99
4.4 Рентгенофазовий аналіз структури бетонів.....	105
4.5 Аналіз технологічної пошкодженості бетонів і фібробетонів	107
4.6 Мікроскопічний аналіз структури бетонів і фібробетонів	112
Висновки за 4-м розділом.....	114
Розділ 5 Впровадження результатів досліджень.....	117
5.1 Вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів.....	117
5.2 Технології приготування і застосування модифікованого бетону для покриттів автодоріг із застосуванням поліпропіленової фібри	124
Висновки за 5-м розділом.....	127
Загальні висновки.....	128
Список використаних джерел	130
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	149
Додаток Б. Титульні сторінки «Регламенту з технології приготування і застосування модифікованого бетону для покриттів автодоріг із застосуванням поліпропіленової фібри».....	152
Додаток В. Довідка про впровадження результатів наукових досліджень в навчальний процес	155

ВСТУП

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

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

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

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі автомобільних доріг і аеродромів Одеської державної академії будівництва та архітектури в рамках держбюджетних тем «Підвищення довговічності модифікованих бетонів для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд» (№ держреєстрації 0116U003195) і «Розробка та впровадження сучасних технологій при будівництві автомобільних доріг, водопропускних споруд та аеродромів» (№ держреєстрації 0111U001249).

Метою роботи є розробка бетонів жорстких дорожніх покриттів з підвищеною довговічністю та міцністю, зокрема ранньою, за рахунок використання фібри, суперпластифікатору з прискорювачем твердіння та активної мінеральної добавки пуцоланового типу.

Для досягнення мети поставлені **завдання**:

- проаналізувати вплив модифікатору комплексної дії (суперпластифікатор – прискорювач твердіння), поліпропіленової фібри та метакаоліну як добавки пуцоланового типу на технологічні властивості сумішей бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів;

- з використанням методів планування експерименту визначити вплив складу бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів на їх міцність, зокрема у ранньому віці;

- визначити вплив кількості портландцементу, модифікатору комплексної дії, поліпропіленової фібри та метакаоліну на властивості бетонів, що визначають їх довговічність в жорстких дорожніх покриттях;

- провести аналіз структури модифікованих бетонів і фібробетонів;

- визначити оптимальні склади фібробетонів жорстких дорожніх покриттів, що забезпечують необхідну міцність при підвищеній в типових умовах експлуатації довговічності;

- провести промислове впровадження отриманих результатів.

Об'єкт досліджень. Модифіковані бетони і фібробетони жорстких дорожніх покриттів.

Предмет досліджень. Закономірності впливу фібри, пуцолани і добавки комплексної дії на структуру і властивості бетонів жорстких дорожніх покриттів.

Методи досліджень. Фізико-механічні характеристики модифікованих бетонів і фібробетонів визначалися відповідно до чинних нормативів на атестованому обладнанні. Експериментальні дослідження виконані за оптимальним 4-х факторним планом. Побудова нелінійних експериментально-статистичних (ЕС) моделей виконувалася із застосуванням спеціалізованої діалогової системи COMPEX. Застосовувалися мікроскопічний і рентгеноструктурний аналіз, аналіз технологічної пошкодженості бетону і пошук оптимальних складів модифікованих бетонів за комплексом отриманих ЕС-моделей.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- встановлено закономірності та ефективності впливу на властивості та структуру модифікованих бетонів для жорстких дорожніх покриттів комплексного модифікатора (пластифікатор + прискорювач твердіння), метакаоліну та дисперсного армування фіброю;

- з використанням методів комп'ютерного матеріалознавства оптимізовані склади поліфункціональних модифікаторів для поліпшення показників якості в ранньому віці модифікованого бетону та фібробетону;

- набуло подальшого теоретичного розвитку і експериментально підтверджено можливість поліпшення фізико-механічних властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів: міцності при згині, корозійної та морозостійкості у солевих розчинах та довговічності (збільшення строків експлуатації) під впливом комплексного модифікатора полікарбосилатного типу, метакаоліну і поліпропіленової фібри;

- вдосконалено метод оцінки довговічності цементобетонного покриття на автодорогах з урахуванням спільного впливу дії транспортного навантаження (міцність при згині та при стиску), водопоглинання та структури (корозійна стійкість до солених розчинів та водонепроникність), вартості.

Практичне значення отриманих результатів. Із застосуванням комплексу ЕС-моделей визначені раціональні склади фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з підвищеною міцністю, зокрема у ранньому віці, морозостійкістю і зносостійкістю. Розроблено і затверджено у державної акціонерної компанії «Автомобільні дороги України» «Регламент з технології приготування і застосування модифікованого бетону для покриттів автодоріг із застосуванням поліпропіленової фібри». Результати досліджень використовуються в освітньому процесі в Одеській державній академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія» за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми та транспортні системи».

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних досліджень модифікованих бетонів і фібробетонів для жорстких покриттів автомобільних доріг, обробці та узагальненні отриманих результатів, виборі раціональних складів фібробетонів та у впровадженні розроблених матеріалів у виробництво.

Всі основні результати досліджень були отримані автором самостійно. Формулювання мети та завдань дисертаційної роботи, планування експериментальних досліджень та обговорення їх результатів виконані разом із науковим керівником. Особистий внесок автора в роботах, що надруковані в співавторстві, полягає в постановці завдань дослідження, проведенні лабораторних досліджень структури і властивостей бетонів і фібробетонів жорстких покриттів та узагальненні їх результатів.

Апробація дисертаційної роботи. Основні результати досліджень доповідалися на: 3-й міжнародній науково-практичній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 2019 р.), міжнародних семінарах «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (м. Одеса, 2019, 2020 рр.), науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (м. Одеса, 2020 р.), 76-й конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури

(м. Одеса, 2020 р.), 3-й всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси» (м. Одеса, 2020 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані у 11 наукових працях, з яких 2 статті у фахових виданнях України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 7 тез доповідей у збірниках наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертацію викладено на 156 сторінках, у тому числі 109 сторінок основної частини, складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (173 найменування) та додатків на 8 сторінках, містить 32 рисунки і 15 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СКЛАД, ВЛАСТИВОСТІ ТА ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ БЕТОНІВ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

1.1 Досвід будівництва і експлуатації жорстких дорожніх покриттів

На сучасному рівні розвитку суспільства в більшості країн світу автомобільні дороги є основою транспортних систем, що задовольняє потреби в пасажирських та вантажних перевезеннях. Частка вантажних перевезень автомобільним транспортом в Україні сьогодні складає близько 30%, але буде збільшуватися і в найближчий час досягне 35%. При цьому в країнах Європи автоперевезення займають близько 50% обсягу [1]. Інтеграція автомобільних доріг України до європейської транспортної мережі стримується фактичною невідповідністю технічних стандартів більшості вітчизняних доріг стандартам Європейського союзу за якістю та ваговими навантаженнями, а також незадовільним рівнем організації безпеки дорожнього руху [2]. Забезпеченість України автомобільними дорогами з твердим покриттям становить 3,3 км на 1000 мешканців або 280 км на 1000 км² території, що менше в порівнянні з будь-якою з країн ЄС [3]. Тобто розвиток автомобільних доріг є пріоритетним завданням для України, вирішення якого є важливим для розвитку транзитного та експортного потенціалів країни.

Автодороги мають суттєві відмінності від більшості будівельних споруд, а саме мають велику протяжність з наближеністю до рельєфу при відносно невеликому об'ємі верхнього шару покриття, яке одночасно і постійно контактує на всій площі з природним середовищем довкілля та з ґрунтом основи автодороги [4, 5]. Стан дорожнього одягу є одним з основних техніко-економічних показників, що визначають вартість автомобільних перевезень [4]. При цьому тип покриття в значній мірі визначає довговічність дорожнього одягу, отже суттєво впливає на витрати на ремонт і утримання дороги.

Найбільш поширеними є два типи дорожніх покриттів: асфальтобетонні та цементобетонні. Жорсткі цементобетонні покриття відрізняються високими експлуатаційними властивостями та при забезпеченні необхідної якості бетону мають високу довговічність [5, 6]. Такі покриття рекомендується використовувати на найбільш завантажених дорогах [7]. Термін служби жорстких дорожніх покриттів є в 2-6 разів довше асфальтобетонних [8,9]. Також важливою перевагою цементобетонних покриттів є те, що для їх виробництва не використовується бітум. Запаси нафти для виробництва бітумів є більш обмеженими, ніж запаси сировини для виробництва цементу. Крім того в Україні значна частка бітумів є імпортованою [8], а потенціал вітчизняних цементних заводів дозволяє значно підвищити випуск цементу [10].

Вартість будівництва доріг з жорстким цементобетонним покриттям на даний час зіставна з вартістю будівництва доріг з асфальтобетонним покриттям. При цьому при збільшенні цін на нафтопродукти вартість будівництва цементобетонних доріг може ставати меншою за вартість асфальтобетонних [11]. Проте вартість подальшої експлуатації доріг з жорсткими покриттями з врахуванням витрат на поточні і капітальні ремонти є набагато нижчою. Наприклад згідно ДБН В.2.3-4:2015 [12] на дорогах II категорії нормативний строк експлуатації цементобетонного дорожнього одягу між капітальними ремонтами складає 21 рік, одягу з ЩМА – 12..14 років, з асфальтобетонного – 10..12 років. У США в залежності від розрахункової інтенсивності руху нормативна довговічність цементобетонних покриттів складає від 20 до 40 років [13]. В середньому через 9..12 років сумарні витрати на будівництво і експлуатацію доріг з асфальтобетонним і цементобетонним покриттям стають рівними, відповідно в подальшому експлуатація дороги з жорстким покриттям стає вигіднішою. У [14] стверджується, що в будь-якому випадку жорсткі дорожні покриття є більш економічним рішенням для довговічних дорожніх одягів, навіть якщо капітальні витрати на їх влаштування відчутно вищі. У [7] наводяться данні, що через 20 років експлуатації вартість життєвого циклу

доріг с покриттями нежорсткого типу буде приблизно на 19% вище, ніж вартість для доріг с жорсткими покриттями.

Цементобетонні покриття є найбільш перспективними з точки зору підвищення несучої здатності, експлуатаційних характеристик і довговічності автомобільних доріг. Це важливо у зв'язку із збільшенням в останні роки інтенсивності руху автотранспорту та рівня динамічних навантажень, а також навантажень на вісь у великовантажних автомобілів і автопоїздів, які часто перевищують 115 кН. Про це також свідчить накопичений закордонний і вітчизняний досвід будівництва і експлуатації доріг з цементобетонним покриттям. У нежорстких дорожніх покриттях навантаження передається від зерна до зерна і через це може виникати втомне і термічне розтріскування, локальне руйнування та зміщення [7]. Цементобетонні покриття краще розподіляють тиск на розташовану під ним основу, ніж асфальтобетонні покриття тієї ж товщини, оскільки їх модуль пружності більше модуля пружності асфальтобетону в 10 і більше разів [8]. Завдяки більш високій міцності цементобетонне покриття є стійким до утворення колійності та хвиль. Краща якість покриття сприяє зменшенню витрат палива транспортними засобами, яке може сягати 15-20% [15-17]. Також цей фактор є позитивним з точки зору захисту навколишнього середовища від забруднення продуктами згорання палива [16]. На більш рівному у порівнянні з асфальтобетоном цементобетонному покритті менш накопичується дощова вода, цементобетон є природно світлішими за асфальтобетон, що сприяє підвищенню безпеки руху автомобільного транспорту. Також цементобетонні покриття характеризуються більш високою зносостійкістю в порівнянні з рядовими асфальтобетонними.

Якість роботи жорстких покриттів менше залежить від дії підвищених температур в жарку пору року, що особливо важливо з врахуванням поступового потепління клімату України та інших європейських країн [8]. В останні роки у всіх регіонах України тривалого періоду, коли температура повітря перевищує +30 °С, постійно збільшується. При такій температурі навіть на півночі країни асфальтобетон нагрівається до температури +60..65°С, при

тому що розрахункова температура асфальтобетонних шарів згідно з нормами на проектування не перевищує $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура випробувань в стандарті на асфальтобетон обмежена $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18]. При такій температурі асфальтобетон стає пластичним і його міцність може бути менше 1,0 МПа.

Обов'язковим для забезпечення якісної роботи цементобетонних покриттях є влаштування деформаційних (компенсаційних) швів різного типу – розширення, стискання, робочих тощо. Вони забезпечують зменшення напружень у матеріалі, що виникають при сезонних і добових змінах температури повітря та усадці при твердінні [19]. При цьому для довговічності дороги в цілому важливим є забезпечення якісної герметизації деформаційних швів покриття [20].

До недоліку цементобетонних покриттів можна віднести їх складніший ремонт. При цьому характерною рисою їх роботи є те, що увесь вплив транспортних засобів та природних чинників в першу чергу сприймаються поверхневим шаром, відповідно руйнування бетону в основному відбувається в поверхневому шарі покриття [21]. Але останнім часом розроблені досить ефективні технології ремонту та підсилення жорстких дорожніх покриттів, в першу чергу за рахунок використання швидкотвердіючих бетонів [22].

Будівництво доріг з жорстким покриттям в сучасному їх розумінні почалося в другій половині 19-го століття у США, Великій Британії, Франції і Німеччині [23]. Перша цементобетонна автомагістраль була побудована в 1912 році в Нью-Джерсі між Broadway і New Village. З 1930х років цементобетонні автобани активно будуються у Німеччині. З кінця 1950х років у США почалося інтенсивне будівництво мережі магістралей між штатами з цементобетонними покриттями [24]. В наш час загальна протяжністю цементобетонних доріг США складає майже 100 тис. км [22].

На сьогодні у США частка доріг з жорстким покриттям складає 60%, у Австрії – 46%, Бельгії – 41%, Німеччині – 31%, Франції – 20 %, Нідерландах – 15%, Португалії – 10%, Іспанії, Італії, Канаді, Швейцарії та Великобританії близько 5% [9, 16, 25]. Обсяги будівництва доріг з цементобетонним покриттям

в світі постійно зростають [5, 17]. Такі дороги масово будуються в Азії, зокрема у Китаї, Південній Америці та Північній Африці. У Чехії за останні 15 років 65% нових доріг будується з цементобетону, також широко будуються такі дороги у Польщі та Словаччині [26]. Досвід Німеччини показав, що після 28 експлуатації ремонт був потрібен лише 5% цементобетонних дорожніх покриттів та 100% асфальтобетонних [27].

В Україні сьогодні переважають дороги з покриттями нежорсткого типу [28]. Перша вітчизняна бетонна дорога Кіпті – Глухів – Бачівськ була побудована у 1957 році на території Чернігівської та Сумської областей [22]. Є позитивний досвід використання цементобетонних покриттів на міських вулицях з великим транспортним навантаженням. Наприклад жорстке дорожнє покриття вулиці Преображенській у Одесі знаходиться у гарному стані після 14 років експлуатації [28]. За даними Укравтодора на сьогодні частка цементобетонних доріг в країні є меншою 2%, при цьому це переважно дороги з залізобетонних плит. Проте в останні роки уряд країни і Укравтодор змінив стратегію розвитку дорожньої мережі і перейшов до будівництва та реконструкції окремих найбільш навантажених доріг з використанням цементобетонних покриттів. Згідно прийнятої Укравтодором спільно з ДП «ДержДорНДІ» і Асоціацію виробників цементу України «Програми розвитку цементобетонних доріг в Україні на 2021–2025 роки» за 5 років має бути побудовано та реконструйовано 2 900 км доріг з використанням жорстких дорожніх покриттів, а їх частка в дорожній мережі має піднятися до 3% [29]. При цьому з врахуванням зростаючих навантажень на дорожні одяги рекомендується віддавати перевагу покриттям з високоміцного бетону класу С32/40 (В40) і вище, а при капітальному ремонті та реконструкції існуючі покриття слід розглядати як основу для підсилення цементобетоном [30].

У 2020 році завершено будівництво першої в новітній Україні дороги з монолітним бетонним покриттям Н-31 Дніпро – Царичанка – Кобеляки – Решетилівка [29]. Протяжність дороги в межах Полтавської області складе 79,4 км, в Дніпропетровській області – 59 км [31]. Жорсткі дорожні покриття

використовуються при будівництві об'їзної дороги Житомира і реконструкції дороги Н-14 на Олександрівка – Кропивницький – Миколаїв [32]. 66 кілометрів новозбудованого цементобетонного покриття дороги Н-14 були відкриті для руху автотранспорту у листопаді 2020 року [33].

Перша сучасна цементобетонна дорога в Молдові між селами Авдарма і Ферапонтьєвка була побудована у 2017 році [34]. Уряд Молдови планує будівництво нових доріг з жорсткими покриттям, зокрема з залученням іноземних компаній.

Згідно ДБН В.2.3-4:2015 [12] для цементобетонних покриттів і основ можуть використовуватися бетони з мінімальним проектним класом від В25 (С20/25) для IV категорії до В40 (С32/40) для категорії I-а. Також при конструюванні і розрахунку дорожнього одягу необхідно враховувати кліматичні та ґрунтово-гідрологічні особливості регіонів дорожно-кліматичних зон будівництва [19]. Окремою вимогою, що регламентується рівними національними та іншими нормативами, є міцність бетону, при якій можна відкривати рух транспорту по дорозі [9, 35].

Для бетонів дорожніх покриттів згідно ДСТУ Б В.2.7.46-2010 «Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови» можна використовувати цементи, що виготовляються на основі клінкеру нормованого складу з вмістом трикальцієвого алюмінату (C_3A) не більше 8%. Є досвід використання шлаколужного цементу для бетону дорожніх покриттів, але його недоліком є порівняно велика усадка матеріалу при твердінні [36].

Вимоги щодо рухомості (легкоукладальності) бетонної суміші, що використовується для влаштування жорстких дорожніх покриттів, залежать від наявного устаткування для приготування, транспортування, укладання і ущільнення даної суміші, а також від типу бетоноукладального обладнання. Суміш має якісно ущільнюватися, не розшаровуватися забезпечувати відсутність опливання кромки покриття. При використанні бетоноукладача з ковзною опалубкою найчастіше використовуються суміші рухомості Р1, рідше – Р2. Тобто з врахуванням часу на транспортування суміші до місця укладання

та втрату рухомості, насамперед в теплий період року, її рухомість при приготуванні найчастіше має складати саме Р2. В окремих випадках використовуються суміші з жорсткістю Ж1, при технології укочуваного цементобетонного покриття використовуються більш жорсткі суміші [37]. Проте в останні роки укочуване цементобетонне покриття використовується рідко через складнощі у забезпеченні необхідної рівності. При цьому технологія укладання покриття з ковзною опалубкою стає основною в Україні, Молдові та світі в цілому.

С.М. Толмачев і С.Й. Солодкий [38] основними причинами руйнувань бетонних покриттів автодоріг називають наступні: утворення тріщин в результаті прикладення багаторазових циклічних механічних впливів; втомні пластичні деформації, що виникають від циклічного дії водонасичення – висихання, заморожування – відтаювання; деформації повзучості; руйнування структури при циклічній дії рідких корозійних середовищ (сольові розчини) і знакозмінних температур. Відповідно важливими фізико-механічними властивостями для забезпечення конструкційних вимог і довговічність дорожніх бетонів є міцність на розтяг при згині, морозостійкість та зносостійкість.

В цілому наведені дані показують, що завдяки об'єктивним перевагам жорстких цементобетонних покриттів будівництво доріг з їх використанням в багатьох країнах світу стає все більш масовим. В Україні та Молдові в останні роки також все частіше використовуються жорсткі цементобетонні покриття. Тобто завдання отримання бетонів з забезпеченою міцністю та підвищеною довговічністю в типових умовах експлуатації покриттів автомобільних доріг на основі вітчизняних компонентів є актуальним. При цьому з позиції технологічності влаштування покриттів та термінів відкриття руху важливою характеристикою є міцність бетонів у ранньому віці.

1.2 Використання модифікаторів як метод керування структурою і властивостями бетонів дорожніх покриттів

В сучасних умовах при виготовленні бетонів жорстких дорожніх покриттів досягнути необхідного рівня економічності одночасно з високою довговічністю та міцністю матеріалу можливо лише при застосуванні ефективних добавок модифікаторів [39,40]. Добавки-модифікатори це речовини, що модифікують, регулюють і змінюють властивості бетонних сумішей, а також структуру і властивості затверділих бетонів та розчинів [41].

Майже 100% бетону, що виготовляється сьогодні у світі, включає ті чи інші хімічні добавки-модифікатори. Застосування модифікаторів є найбільш простим і ефективним з економічної і технологічної точки зору способом впливу на структуру бетону, спрямованим на керування його фізико-механічними властивостями [42, 43]. Завдяки грамотному застосуванню добавок, зокрема комплексних, можливо отримання бетонів із широким спектром заданих властивостей, включаючи показники, що обумовлюють довговічність бетонів жорстких дорожніх покриттів [44].

Згідно ДСТУ Б В.2.7-171:2008 добавки в залежності від основного ефекту їх дії підрозділяються на: добавки, що регулюють властивості бетонних та розчинних сумішей; добавки, що змінюють властивості бетонів і розчинів; добавки, що надають бетонам або розчинам спеціальних властивостей [45]. В.Б. Ратінов за механізмом дії на процеси гідратації в'язучих розділяв добавки на чотири класи: електроліти, що змінюють розчинність в'язучих речовин, добавки, що реагують із в'язучими з утворенням важкорозчинних або малодисоційованих сполук, готові центри кристалізації, органічні поверхнево-активні речовини (ПАР) [46].

В якості модифікаторів в сучасній будівельній індустрії найбільш широко використовуються пластифікатори, при цьому фактично найбільш ефективний їх тип – суперпластифікатори [41]. Суперпластифікатори за своєю хімічною природою переважно є аніонактивними органічними речовинами колоїдного

розміру з великою кількістю полярних груп в ланцюзі [47]. За хімічним складом суперпластифікатори прийнято поділяти на чотири основні групи: сульфовані меламіноформальдегідні смоли, продукти конденсації нафталінсульфокислоти і формальдегіду, модифіковані лігносульфонати, добавки на основі полікарбоксилатів [41, 48]. Завдяки зниженню водопотєби суміші суперпластифікатори сприяють утворенню дрібнопористої та однорідної структури цементної матриці, що знижує об'єм відкритих пор у бетоні та їх діаметр, підвищує однорідність за розмірами [49]. При введенні пластифікатору відбувається початкове уповільнення процесів гідратації цементу, що в середньому триває 2..3 години до отримання коагуляційної структури. Надалі твердіння цементної матриці прискорюється. Такий ефект пояснюється проникністю шару добавки на поверхні зерен цементу для води та її дефлокуючою дією, яка збільшує площу контакту зерен і води та прискорює зростання новоутворень [47].

Тобто основний ефект пластифікаторів (суперпластифікаторів) досягається за рахунок того, що ці модифікатори дозволяють отримувати суміші необхідної рухомості при зниженому значенні В/Ц. Для бетонів жорстких дорожніх покритті рухомість є дуже важливим показником, оскільки при високій рухливості суміш неможливо укласти комплектом укладальних машин через розшарування при вібрації і опливання кромки покриття (особливо в ковзаючій опалубці), а при низькій – суміш неможливо якісно ущільнити [38].

На сучасному етапі розвитку технологій бетону найбільш ефективними суперпластифікаторами є добавки полікарбоксилатного типу. Їх застосування дає можливість отримувати широкий спектр високофункціональних бетонів з покращеною довговічністю і експлуатаційними властивостями, зокрема з підвищеною зносостійкістю і хімічною стійкістю [50]. Полікарбоксилати як модифікаторі нової генерації є обов'язковою складовою високоефективних цементних композитів наряду з мінеральними дисперсними складниками, дво-, трифракційним дрібним і крупним заповнювачем [51, 52].

Молекулярна структура полікарбоксилатних суперпластифікаторів сприяє прискоренню гідратації цементу, а швидка адсорбція молекул на частинках в'язучого та дисперсійний ефект забезпечують збільшення поверхні реакцій гідратації [53]. Завдяки суттєвому зниженню водопотреби суперпластифікатори полікарбоксилатного типу забезпечують значне зближення частинок цементуючої системи та стиснуті умови процесу гідратації, що дає можливість створення щільної мікроструктури композиту. Але одночасно з цим відбувається часткове блокування ранньої гідратації C_3S та C_3A , зниження іонного обміну $Ca^{2+} \rightarrow 2H^+$, зменшення концентрації іонів Ca^{2+} в рідкій фазі та відповідне підвищення основності гідросилікатів [54].

У [55] на основі портландцементу ПЦ II/A-III400 отримано бетони дорожніх покриттів класів B25 і B30. У [39] на основі аналогічного цементу за рахунок використання полікарбоксилатів отримано дорожні цементобетони класів B30 і B40 з високою морозостійкістю, водонепроникністю і зносостійкістю. Використання добавки також спряло підвищенню ранньої міцності бетону. У [56] за рахунок використання полікарбоксилатної добавки MasterGlenium SKY 608 отримано бетони класів C50/60 (на основі портландцементу ПЦ II/A-III-500) і C40/50 (на основі цементу ПЦЦ IV/A-500 P) для ремонту жорстких дорожніх покриттів. У [57] використання полікарбоксилатів фірми «Sika» дозволило заощадити 30-85 кг/м³ цементу на кубометр бетону дорожнього покриття при забезпеченні міцності та зносостійкості матеріалу.

Крім хімічних добавок-модифікаторів активно управляти структурою і властивостями бетонів дозволяють мінеральні добавки [46, 48, 58]. Від хімічних добавок мінеральні добавки відрізняються тим, що не розчиняються у воді, а у порівнянні з наповнювачами вони мають більш дрібний розмір зерен. Слід зауважити, що всі дрібнодисперсні наповнювачі в залежності від наявності гідравлічної активності поділяються на активні та інертні [59], тобто мінеральними добавками в повному сенсі можна вважати активні дрібнодисперсні наповнювачі. Тобто мінеральні добавки є тонкою складовою

твердої фази бетону і частіше всього вони виробляються на основі техногенної сировини [48]. Мінеральні добавки дозволяють керувати процесами гідrataції цементних мінералів, впливають на порову структуру композиту, дозволяють знизити усадки бетону чим сприяють підвищенню його довговічність завдяки зменшенню величини усадочних тріщин [59, 60]. Введення ультрадисперсних часток мінеральних добавок, що складаються з аморфного діоксиду кремнію, з одночасним зниженням водопотреби суміші за рахунок використання суперпластифікаторів є ефективним шляхом формування високоміцної та щільної структури бетону [61]. Ультрадисперсні частки в цементному композиті, що прагне до зменшення поверхневої енергії у процесі структуроутворення, об'єднуються в кластери різних розмірів і створюють псевдофазу. Такий стан системи при оптимальному насиченні мінеральною добавкою забезпечує зміцнення структури бетону [59]. Завдяки високій питомій поверхні дрібнодисперсні частки впливають на фізико-хімічні процеси на поверхнях розділу фаз [62] і мають здатність знижувати об'ємні зміни цементних композитів при твердінні, що дозволяє управляти пористістю бетону, зокрема розміром пор і ступенем їх однорідності [60].

Для бетонів дорожніх покриттів ефективним методом керування структурою і властивостями є використання активних мінеральних добавок пуцоланового типу [63], зокрема мікрокремнезему і метакаоліну [64-66]. Пуцолани зв'язують вільний гідроксид кальцію у гідросилікати, що знижує середній розмір пор у бетоні [67] і пористість контактної зони цементного каменя з заповнювачем [68]. Мікрокремнезем – це конденсований на фільтрах систем газоочищення плавильних металургійних печей аерозоль. Ця доволі ефективна добавка є досить дорогою на сучасному будівельному ринку, тому її використання в таких масових конструкціях, як жорсткі дорожні одяги не вигідно з економічної точки зору. Наприклад у [69] у якості альтернативної та більш дешевої пуцолани для бетонів дорожніх покриттів використовувалася зола рисової соломи. Це дало змогу зменшити товщину дорожніх плит на 11%, а вартість бетону на 3%.

В останні роки в Україні у якості пуцолани все активніше використовується метакаолін [70-72], який набагато дешевший в порівнянні з мікрокремнеземом [64]. В світовій будівельній індустрії в якості часткової заміни цементу використання метакаоліну починається ще з 1960-х років [73]. Ефективність даного виду пуцолани також обумовлена тим, що Україна посідає одне з провідних місць у світі за кількістю запасів каолінів [74].

Метакаолін суттєво впливає на процес структуроутворення цементної матриці в бетоні, чим сприяє зниженню проникності та усадки композиту, а також підвищенню його морозостійкості та корозійної стійкості [63, 65, 66]. Тобто за рахунок спрямованої зміни структурою і властивостями бетону при застосуванні пуцолани можливо підвищити довговічність матеріалу. Також використання метакаоліну дозволяє керувати темпом набору міцності бетону, зокрема підвищувати ранню міцність [73, 75]. Проте використання метакаоліну у великих дозах сприяє утворенню метастабільних алюмінатів і гідросилікатів підвищеної основності, що навпаки знижує довговічність цементних матеріалів [75]. Тобто для проявлення позитивної ролі даного модифікатору важливо вірно визначити його раціональну кількість в складі конкретного типу бетону.

У роботі [65] заміна 10% від кількості цементу метакаоліном дозволило покращити механічні характеристики самоущільнюваних бетонів дорожніх покриттів, проте підвищення кількості модифікатору до 15% вже негативно впливало на міцність через зростання водопотреби суміші. Аналогічно у [76] при заміні 10..12% цементу метакаоліном досягнуто підвищення міцності дрібнозернистого бетону. За рахунок заміни 10-15% цементу пуцоланом, отриманим подрібненням кальцинованої глини і вапняку (пропорція 2:1), у [77] була знижена пористість та проникність бетону при збереженні його міцності.

Проте метакаолін характеризується високою дисперсністю і у [66] показано, що ця добавка надає позитивний вплив на довговічність і усадку бетону лише при низькому В/Ц суміші, тобто при її використанні сумісно з суперпластифікатором. Таким чином з врахуванням впливу на водопотребу

суміші пуцолани є ефективні саме в складі комплексних модифікаторів. Наприклад у [78] застосування комплексного модифікатору, який складався з метаксаоліну, мікрокремнезему та суперпластифікатору дозволило прискорити твердіння бетону, знизити його відкриту пористість та сприяло формуванню мікроструктури переважно з стабільних гідратних новоутворень, що дозволило підвищити морозостійкість матеріалу. У [79] введення комплексного модифікатора з гіперпластифікатору, гідрофобізатору і метаксаоліну дозволило підвищити міцність цементного каменю на 75%, при цьому у складах з комплексним модифікатором кристалічні новоутворення характеризувалися значно меншою дисперсністю, ніж в складах без добавки.

Як показано у роботах багатьох дослідників, використання комплексних модифікаторів дозволяє суттєво розширити функціональні можливості бетонів та одночасно вплинути на більш широкий спектр їх властивостей [64, 49, 80, 81]. Комплексні модифікатори є добавками поліфункціональної дії і поєднують індивідуальні добавки різного типу і функціонального призначення [49, 80]. Тобто вони є багатокомпонентними за рахунок чого дозволяють ефективно управляти структуроутворенням на всіх етапах приготування композиту і отримувати бетони з необхідними експлуатаційними властивостями та технологічністю. Розрізняють комплексні модифікатори, що складаються з декількох модифікаторів одного типу і комплекси з модифікаторів різних типів [42, 46]. Більшість комплексних модифікаторів для бетонів і будівельних розчинів включають добавки-пластифікатори (суперпластифікатори), а самі комплекси найчастіше відносяться до одної з чотирьох груп: суміші ПАР, суміші електролітів, суміші електролітів та ПАР, суміші хімічних і мінеральних добавок [64, 81].

Для бетонів дорожніх покриттів достатньо ефективним є використання комплексного модифікатору, який складається з суперпластифікатору полікарбосилатного типу і повітровтягувальної добавки [39]. Л.Й. Дворкін вказує, що застосування одночасно повітровтягувальних і пластифікуючих добавок при використанні відповідних вихідних матеріалів і догляді за бетоном

є ефективним методом забезпечення морозостійкості бетонів дорожніх покриттів [82]. Це підтверджено, зокрема, у [83], де застосування комплексу з суперпластифікатора та повітрязахоплюючої добавки дозволило підвищити міцність і довговічність дорожнього покриття, при цьому майже на 60% була знижена стиранність бетону.

У [84] за рахунок застосування комплексного модифікатора з суперпластифікатору і пуцолани (мікрокремнезему) була суттєво підвищена водонепроникність, тріщиностійкість і морозостійкість бетонів жорстких дорожніх покриттів. У [85] при використанні комплексного модифікатора з полікарборсилатної добавки Glenium ACE і мікрокремнезему при тривалих циклічних механічних впливах на покритті автомобільних доріг бетон в більшій мірі зберігав аморфну структура гідросилікатів, що позитивно впливало на міцність даних покриттів. У [86] міцність та тріщиностійкість бетонів дорожніх покриттів були покращені при використанні комплексу з мінеральних добавок (цеоліт і вапняк) повітровтягувальної добавки і полікарборсилатного суперпластифікатора. У [87] комплексна добавка з полікарборсилатного суперпластифікатора і мікрокремнезему значно підвищила стійкість дорожнього покриття до циклічних навантажень. У [88] за рахунок комплексного модифікування суперпластифікатором і мікрокремнеземом отримано дрібнозернисті бетони для дорожніх плит з міцністю 85 МПа, морозостійкістю F300 і водонепроникністю W16. У [89] при використанні комплексного модифікатора з полікарборсилатного суперпластифікатора, мікрокремнезему і меленого піску отримані літі бетони дорожніх покриттів класів від B30 до B60. Модифікатор, що складається з метаколіну (1,5-3,5%), мікрокремнезему (5%), суперпластифікатору СП-1 (0,6-0,9%) та який дозволяє ефективно підвищити ранню і марочну міцність цементного каменю, запропоновано у [90]. У [91] за рахунок введення комплексного модифікатора з вуглецевих наночасток і суперпластифікатору міцність дорожніх бетонів була підвищена у 1,5 рази, морозостійкість майже у 2 рази, стиранність знижена на 30.. 50%.

Для дорожніх покриттів актуальним є завдання підвищення ранньої міцності при забезпеченні необхідного рівня міцності в «марочному віці». На сучасному рівні розвитку будівельних технологій вона ефективно вирішується за рахунок застосування комплексних модифікаторів, що містять суперпластифікатор і прискорювач твердіння. Наприклад у [92] для безпропарювальних режимів твердіння бетону рекомендовано комплексні добавки у складі суперпластифікаторів нафталінформальдегідного та полікарбосилатного типу і прискорювачів твердіння нітрату кальцію і нітриту кальцію (натрію). У [93] самоущільнюючі бетони високої міцності і морозостійкості для покриттів доріг отримано за рахунок використання комплексу, що складається з гіперпластифікатора, активного кремнезему і регулятора швидкості твердіння. У [94] отримано жорсткі дорожні покриття з високою ранньою міцністю без погіршення їх основних фізико-механічних і експлуатаційних характеристик за рахунок застосування суперпластифікатора СЗ спільно з поліпропіленовою фіброю і прискорювачем твердіння Na_2CO_3 .

Таким чином з врахуванням сучасного рівня розвитку галузі виробництва будівельних матеріалів фактично обов'язковою умовою отримання бетонів з високою міцністю та довговічністю при забезпеченні достатньої рухомості суміші є використання модифікаторів, насамперед ефективних пластифікаторів. Досягнути комплексного спрямованого впливу на структуру та властивості бетону, зокрема на його ранню міцність, дозволяє використання комплексних модифікаторів.

1.3 Вплив дисперсного армування на властивості бетонів жорстких дорожніх покриттів

Для активного впливу на деякі властивості бетонів в сучасному будівництві все ширше застосовується дисперсне армування, яке виконується за рахунок введення волокон фібри, що рівномірно розподіляються в матриці

композиту. У якості фібри використовуються різні види волокон: сталеві, полімерні (поліпропіленові, нейлоні, поліефірні, акрилові, поліетилені), скляні, вуглецеві, базальтові, азбестові та інші [95-97].

Застосування навіть відносно невеликої кількості дисперсної арматури дозволяє істотно змінити механічні властивості композиційних матеріалів. У цементному камені армування фіброю знижує притаманну йому крихкість [96]. У цементно-піщаній матриці розподілені волокна перешкоджають переміщенню окремих блоків або дислокацій, перерозподіляють навантаження від механічних і термічних впливів, перешкоджають виникненню і зростанню тріщин. Тобто волокна не лише сприймають розтягують зусилля, але і перешкоджають зсуву блоків мікроматриці, на що вказують дослідження ударної в'язкості і деформативних властивостей дисперсно-армованих бетонів [98]. В порівнянні з класичним бетоном фібробетони зазвичай мають більш високий модуль пружності, вищу міцність на розтяг, морозостійкість, тріщиностійкість, вогнестійкість, стійкість до стирання, ударів і атмосферного впливу, меншу усадку [95, 99, 100]. Таким чином, за рахунок дисперсного армування бетон як композиційний матеріал отримує новий відмінний за поведінкою структурний елемент, що суттєво впливає на властивості композиту [95, 101].

Якість роботи дисперсно-армованих композитів залежить від забезпечення спільної роботи елементів їх структури, в першу чергу волокон і матриці. Спільна робота визначається переважно зчепленням волокон з матрицею і забезпеченням їх інертності один до одного [102]. В цементних бетонах зчеплення волокон фібри з матрицею відбувається за рахунок фізичної адгезії, зумовленої нерівностями на поверхні волокон, а також за рахунок механічного заклинювання фібри цементно-піщаною матрицею і крупним заповнювачем [95, 97, 103]. Залежно від взаємодії матриці з волокнами фібри, їхньої орієнтації та концентрації по-різному відбувається деформація й руйнування дисперсно-армованого бетону [95].

Щільна упаковка заповнювача і відповідна зниження В/Ц суміші сприяють підвищенню ефективності дисперсного армування. Так у [40] за рахунок введення поліпропіленової фібри і полікарбонатного суперпластифікатору було отримано бетони аеродромних покриттів з морозостійкістю F600. У [104] більша ефективність використання поліолефінових волокон досягалася при нижчих значеннях В/Ц суміші – міцність на розтяг бетону дорожніх покриттів зростала на 19..29%. У [105] за рахунок досягнення щільної структури при використанні ефективних суперпластифікаторів одночасно з дисперсним армуванням були отримані над високопродуктивні фібробетони для швидкого та стійкого до високих навантажень ремонту жорстких дорожніх покриттів.

Для бетонів дорожніх покриттів доволі часто використовується металева фібра [99, 100]. Вона показує свою ефективність у вирішенні задачі підвищення міцності бетонів на розтяг та їх тріщиностійкості, а також позитивно впливає на величину міцності при стиску. У [106, 107] завдяки використанню металевої фібри вдалося знизити товщину шару цементобетонну дорожнього покриття без погіршення її експлуатаційних властивостей. Але при оголенні металева фібра може чіплятися за шини, робити проколи, шуміти при наїзді колеса [108]. Крім того у регіонах, де взимку для боротьби з льодом використовуються солі, спостерігається швидка корозія сталевих волокон [109]. У [110] встановлено, що під дією атмосферних впливів поліпропіленові волокна забезпечує кращу довговічність бетону, ніж сталева, яка швидше втрачає свої властивості. Вибір фібри завжди слід проводити, виходячи з функціонального призначення конструкцій і умов їх експлуатації з урахуванням видів корозійних впливів [111]. Зокрема, у дорожніх фібробетонах має застосування лугостійка фібра [112]. Тому для покриттів автомобільних доріг у країнах з прохолодним і помірним кліматом, зокрема для України і Молдови, бажано використовувати неметалеві волокна, насамперед полімерні, базальтові та скляні.

Наприклад у [113] були суттєво покращені фізико-механічні характеристики дорожніх покриттів за рахунок застосування скляної фібри і суперпластифікатору. Але недоліком скляних волокон є те, що вони частково

пошкоджуються і втрачають міцність, оскільки при змішуванні і ущільненні піддаються впливу ударів і стиранню частинками заповнювача [114].

У [115] за рахунок введення базальтової фібри (1% від маси) міцність на розтягування високоміцного бетону була підвищена на 42..48%. У [112] максимальну міцність дорожнього покриття отримано при використанні поліпропіленової фібри у кількості 2,5% від маси цементу. У [116] використання базальтової фібри довжиною від 12 до 50 мм дозволило суттєво підвищити зносостійкість і міцність на розтяг бетонів жорстких дорожніх покриттів, але їх міцність на стиск при цьому дещо знизилася. У [117] за рахунок комплексної модифікації та дисперсного армування базальтовим волокном діаметром 13-17 мкм та довжиною 14 мм отримано дорожні бетони класу B55 з морозостійкістю F400.

В бетонах жорстких дорожніх покриттів в останні роки широко і успішно використовується поліпропіленова фібра. С.М. Томачев у [118] робить висновок, що поліпропіленова фібра в найбільшій мірі підходить для застосування в дорожніх цементних бетонах. Вперше поліпропіленове волокно у якості дисперсної арматури було використано у 1965 році в бетоні для будівництва стійких до вибуху споруд Інженерного корпусу США [119]. Поліпропілен має високу хімічну стійкість до лужного середовища [120]. Поліпропіленове волокно довільно розподіляється в матриці бетону, що забезпечує міцність у всіх напрямках, а гідрофобна поверхня волокон погано змочується цементним тістом, що запобігає подрібненню фібри при перемішуванні суміші [119]. Поліпропіленове волокно є одним з найбільш екологічних для виробництва фібробетонів жорстких дорожніх покриттів, тому що дозволяє досягнути найменшої вуглецевої емісії при виробництві кінцевого матеріалу [121].

У [122] за рахунок введення поліпропіленових волокон у кількості 0,5-1% від маси цементу та латексу міцність при згині дорожнього бетону була підвищена на величину до 45%. У [118] дисперсне армування поліпропіленовим волокном дало змогу підвищити міцність на розтяг при згині

бетонів дорожніх покриттів на 20%, на 25% знизити їх стиранисть і на одну марку підвищити морозостійкість. У [120] при використанні 4 кг/м^3 поліпропіленової фібри міцність на розтяг дрібнозернистого бетону дорожнього покриття підвищувалася на 38%, міцність на стиск – на 13%. У [123] поліпропіленова фібра не вплинула на міцність бетонів дорожніх покриттів при стиску, проте сприяла підвищенню міцності на розтяг при згині та при достатній довжині волокон змінювала характер руйнування бетону після прикладання критичного навантаження на менш крихкий. У [119] введення поліпропіленової фібри у кількості 0,2-0,3% від об'єму сприяло підвищенню міцності дорожнього покриття на основі жорстких сумішей як при стиску, так і розтяг при згині, при цьому також було досягнуто підвищення зносостійкості бетону, але менш відчутне. У [124] найбільший приріст міцності бетону дорожнього покриття при стиску, осьовому розтягу і розтягу при згині було досягнуто при введенні поліпропіленом фібри у кількості 1,5% від маси цементу. У [125] за рахунок введення раціональної кількості поліпропіленової фібри суттєво підвищено зносостійкість, морозостійкість та міцність на розтяг бетонів дорожніх покриттів на різних типах щебеню. Є позитивний досвід дисперсного армування поліпропіленовою фіброю з метою покращення деформаційних властивостей ґрунтобетонів для нижніх шарів дорожнього одягу [126].

За рахунок полідисперсного армуванні матриці поліпропіленовою (0,3%) і сталеву (1,7%) фіброю у [127] досягнуто істотного поліпшення фізико-механічних показників фибробетону дорожнього покриття. При цьому поліпропіленове волокно впливало переважно на показники тріщиностійкості, а сталеві фібри – на міцність. Тобто при раціональному співвідношенні армування різними фібрами було досягнуто синергетичного ефекту поліпшення статичних і динамічних показників фибробетону.

У [107] аналіз співвідношення витрат показав, що при однаковій несучій здатності армовані сталевим волокном бетони дорожніх покриттів є неекономічними в порівнянні з бетонами, армованими поліпропіленовою

фіброю і скловолокном. Тобто при однакових характеристиках армовані поліпропіленовим волокном бетони можуть забезпечити більш дешеві жорсткі покриття, ніж бетони з сталевією фіброю та неармовані бетони.

Дисперсне армування дозволяє суттєво підвищити тріщиностійкість бетонів жорстких дорожніх покриттів та інших конструкцій [84, 128]. Армування фіброю є рівномірним по всьому об'єму, що сприятливо впливає на розподіл напружень у бетоні та призводить до зменшення напружень в небезпечних зонах [84]. Наприклад у [128] за рахунок введення $0,8 \text{ кг/м}^3$ поліпропіленової фібри кількість проявлених тріщин на одиницю площі покриття знижувалася на 16..62%, а ударостійкість бетону зростала на 130..250%. Більша тріщиностійкість фібробетонів дозволяє зменшити товщину шару жорсткого дорожнього покриття та підвищити відстань між швами [129]. Як показано у [130], саме тріщиностійкість цементобетонного покриття в значній мірі визнає його довговічності в умовах спільного впливу деформацій у наслідок зміни температури та вологості, а також дії транспортних засобів. Є досвід укладання 30-метрових ділянок фібробетонного дорожнього покриття без усадочних швів [131].

У [132] за рахунок армування поліпропіленовою фіброю міцності на розтяг при згині цементних дорожніх бетонів була підвищена 22%, при цьому максимальний ефект проявлявся при роботі бетону в закритичній стадії, коли в процес утворення та розвитку тріщин вступають волокна. У [133] показано, що армування поліпропіленовою і базальтовою фіброю сприяє зростанню критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень бетону, що дає змогу витримувати критичніші навантаження до моменту зрушення макротріщини. При короткочасних навантаженнях, навіть досить інтенсивних, волокна не встигають висмикнутися з матриці бетону, що обумовлює суттєве підвищення ударостійкості та зносостійкості матеріалу [134, 135]. Здатність фібробетонів сприймати навантаження навіть після розтріскування дозволяє проектувати дорожні покриття з урахуванням реакції, що виходить за межі пружних деформацій [129].

Підвищення тріщиностійкості бетонів при застосуванні фібри крім того пояснюється здатністю волокон сприймати напруження розтягування, а також можливістю зниження деформацій усадки і набухання бетону за рахунок дисперсного армування [63, 136]. Дисперсне армування підвищує стійкість бетону до поперемінного циклічного навантаження, за рахунок чого підвищується зокрема морозостійкість матеріалу [137]. При цьому збільшення морозостійкості при застосуванні фібри відбувається незважаючи на деякий ріст кількості капілярних пор [138]. Для бетонів дорожніх покриттів зниження вологісних деформацій та підвищення морозостійкості є вельми важливими, оскільки керування цими властивостями є шляхом до підвищення довговічності покриттів в типових для них умовах експлуатації [136]. Наприклад у [63] дисперсне армування поліпропіленовою фіброю дозволило знизити на 10% розхід цементу в бетоні дорожнього покриття.

Таким чином дисперсне армування є ефективним методом впливу на структуру бетонів жорстких дорожніх покриттів, який при раціональному використанні дозволяє підвищити міцність при згині, морозостійкість, зносостійкість, тріщиностійкість і ударостійкість бетону, знизити усадку матеріалу при твердінні та деформації в процесі експлуатації. З врахуванням специфіки умов експлуатації дорожніх покриттів у якості дисперсної арматури слід використовувати волокна, що не піддаються корозії та не будуть чинити потенційної небезпеки для шин автомобільного транспорту. Такими волокнами є полімерні, зокрема поліпропіленові, які найбільш розповсюджені на будівельному ринку та досвід використання яких підтвердив їхню ефективність.

1.4 Робоча гіпотеза, мета і завдання роботи

Довговічність цементобетонного дорожнього покриття в значній мірі залежить від конструктивних особливостей дорожнього одягу в цілому:

товщини та матеріалів шарів основи, товщини самого цементобетонного покриття, відстані між швами стискання і розширення та їх конструкції [139].

Безпосередньо для матеріалу самого жорсткого (цементобетонного) дорожнього покриття в типових умовах експлуатації довговічність визначається насамперед такими показниками якості:

- міцність на розтяг при згині, яка обумовлює стійкість від розтягуючого напруження, яке виникає від дії коліс транспортних засобів, через що у покритті з часом можуть з'являтися втомні пошкодження;

- морозостійкість, яка визначає стійкість жорсткого (цементобетонного) дорожнього покриття до дій перемінного заморожування і відтаювання та до дій температурних напружень, що виникають внаслідок добових і річних температурних коливань;

- зносостійкість, яка визначає стійкість дорожнього покриття абразивного впливу пневматичних коліс транспортних засобів під час їх руху.

Також в умовах впливу на дорожнє покриття агресивних речовин, насамперед солей, що використовуються для боротьби з ожеледицею, важливим з позиції довговічності бетону є його водонепроникність.

Окремо слід зазначити, що з позиції скорочення термінів відкриття руху на дорозі та полегшення проведення технологічних процесів будівництва важливим показником якості бетону дорожнього покриття є його рання міцність, хоч цей показник якості безпосередньо і не пов'язаний з довговічністю покриття.

Таким чином, проведений огляд технічної літератури за темою дисертації та аналіз стану бетону жорстких дорожніх покриттів доріг України та Молдови дозволив сформулювати *робочу гіпотезу* роботи.

Існуючі методи і критерії оцінки довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів враховують окремо дії навантаження від транспортних засобів, або зміни температур, або характеристик бетону.

Врахування спільного впливу модифікації бетону, зміни температур та вологості, а також навантаження від транспортних засобів дозволять оцінити якість цементобетонного покриття та прогнозувати заданий строк експлуатації.

Улаштування цементобетонного покриття з покращеними властивостями за рахунок використання комплексних модифікаторів (пластифікатор-прискорювач твердіння), метакаоліну (активної добавки) і дисперсного армування стійкою до корозії поліпропіленовою фіброю дозволить поліпшити структуру і фізико-механічні характеристики модифікованого бетону, підвищити його експлуатаційні властивості та довговічність, що буде впливати на зменшення грошових витрат при утриманні цементобетонного покриття, а також експлуатації автодоріг в цілому.

Виходячи з такої робочої гіпотези і спираючись на проведений огляд технічної літератури, була сформульована *мета роботи*: розробка бетонів жорстких дорожніх покриттів з підвищеною довговічністю та міцністю, зокрема ранньою, за рахунок використання фібри, суперпластифікатору з прискорювачем твердіння та активної мінеральної добавки пуцоланового типу.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані завдання дослідження, які наведені у вступі дисертації.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика використаних в дослідженнях матеріалів

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

В якості в'язучих використовувався портландцемент ПЦ II/A-III-500 виробництва ПАТ «Дікергофф Цемент Україна», філія «Волинь-Цемент», Ольшанський цементний завод (ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Цементи загальнобудівельного призначення).

Питома поверхня даного цементу складає 280 м²/кг, хіміко-мінералогічний склад його клінкеру наведено у таблиці 2.1.

У якості заповнювачів для бетонів в дослідженнях використовувалися наступні матеріали.

Кварцовий пісок з модулем крупності 2,7. Походження піску – Микитівський кар'єр Вознесенського району Миколаївської області. Насипна густина піску 1410 кг/м³. Пісок відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95. Випробування піску здійснювалося згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 «Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань». Для видалення пилюватих і глинистих часток з піску він промивався водою, після чого просушувався на повітрі. Зерновий склад промитого кварцового піску наведено в таблиці 2.2.

Гранітний щебінь фракції 5-10 мм. Насипна густина щебеню 1480 кг/м³. Зміст пилюватих частинок в щебені 0,5%. Марка гранітного щебеню за дробимістю 1200. Вміст зерен пластинчастої форми 20%. Щебінь відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 «Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови».

Таблиця 2.1

Хімічний та мінералогічний склад клінкеру портландцементу ПЦ II/A-III-500 виробництва ПАТ «Дікергофф Цемент Україна», філія «Волинь-Цемент»

Назва показника	Позначення показника	Кількісне значення
Оксид кальцію	CaO	64,49 %
Оксид кремнію	SiO ₂	20,32 %
Оксид алюмінію	Al ₂ O ₃	5,28 %
Оксид заліза (III)	Fe ₂ O ₃	4,05 %
Оксид заліза (II)	FeO	-
Оксид магнію	MgO	0,74 %
Вміст іону хлору	Cl	-
Нерозчинний залишок	HЗ	0,28 %
Втрати при прожарюванні	ВПП	0,33 %
Коефіцієнт насичення	КН	0,94
Силікатний модуль	n	2,26
Глиноземистий модуль	p	1,31
Трикальцієвий силікат	C ₃ S	66,95 %
Двохкальцієвий силікат	C ₂ S	13,15 %
Трикальцієвий алюмінат	C ₃ A	7,42 %
Чотирьохкальцієвий алюмоферит	C ₄ AF	12,48 %

У якості модифікаторів використовувалися такі компоненти.

Добавка комплексної дії полікарбоксилатного типу Coral ExpertSuid 5. Добавка є гіперпластифікатором у поєднанні з прискорювачем твердіння. Виробляється на основі полімерів карбонових кислот і ефірів згідно ТУ У В.2.7-24.6-35365973-001:2008 компанією Coral, м. Запоріжжя. Склад добавки

спроєктований провідними фахівцями в галузі будівельної хімії України у співпраці з науковцями Німеччини [140].

Таблиця 2.2

Зерновий склад кварцового піску

Остатки на ситах	Розмір отворів сит, мм					Прохід скрізь сито 0,16
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
частні, %	13,3	10,1	29,8	33,9	9,8	3,1
повні, %	13,3	23,4	53,2	87,1	96,9	

Метакаолін – дисперсний продукт, отриманий термообробкою збагаченого природного каоліну Дерманківського родовища Рівненської області. За рахунок термічної обробки вода видаляється і утворюється аморфний силікат алюмінію, що має хімічну формулу $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ [139]. Виробник ТОВ «Західна каолінова компанія» (Рівненська область). Відповідає ТУ У В.2.7-08.1-31108661-001:2014 «Добавка мінеральна до бетонів та розчинів – метакаолін високоактивний. Технічні умови». Хімічний склад мета каоліну: SiO_2 – 52,6%, Al_2O_3 – 39,8%, Fe_2O_3 – 1,9%, CaO – 1%, R_2O – 0,1%, інші – 2%, п.п.п. – 2,0%.

Також в дослідженнях при виготовленні фібробетонів використовувалася поліпропіленова фібра «MicroArm» виробництва ТОВ «ДІФ» (м. Дніпро) з довжиною волокон 12 мм і діаметром 20 мкм. Волокна мають питому вагу $0,91 \text{ г/см}^3$, температуру плавлення $162 \text{ }^\circ\text{C}$, температуру запалювання $593 \text{ }^\circ\text{C}$, є лугостійкими і кислотостійкими.

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

2.2 Методика досліджень фізико-механічних властивостей і структури бетонів жорстких дорожніх покриттів

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

Перемішування бетонних сумішей проводилося в лабораторному змішувачі примусового типу.

При використанні у складі бетону фібри волока вводилися в бетонозмішувач після подачі в нього щебеню і піску, але до введення цементу, води і добавки для забезпечення їх рівномірного розподілу.

Твердіння бетонних зразків відбувалося в нормальних (стандартних) умовах, тобто при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$ та вологості $95 \pm 5\%$.

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

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

Стиранність бетонів і фібробетонів визначалася на зразках-кубах з ребром 7,07 см на колі стирання ЛКИ-3 відповідно до ДСТУ Б В.2.7-212:2009 «Бетони. Методи визначення стиранності».

Водонепроникності бетонів і фібробетонів визначалася за методом мокрої плями згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» на зразках-циліндрах діаметром 150 мм і висотою 150 мм. Водонепроникність бетонів додатково контролювалася за повітропроникністю приладом «АГАМА-2» на зразках-кубах з ребром 15 см.

Середня густина і пористість бетонів визначались згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» на зразках кубах з ребром 10 см.

Рентгенофазовий аналіз структури цементно-піщаної матриці бетонів і фібробетонів проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 в монохроматизованому $\text{Co-K}\alpha$ випромінюванні ($\lambda = 1,7902\text{\AA}$). Ідентифікація сполук (фаз) проводили шляхом порівняння міжплощинних відстаней (d , \AA) і відносних інтенсивностей ($I_{\text{отн}} - I/I_0$) експериментальної кривої з даними електронної картотеки PCPDFWIN [141].

Мікроскопічний аналіз структури бетонів і фібробетонів проводився за допомогою металографічного оптичного мікроскопа Sigeta MM-700 в режимі кольорового зображення. Фотозйомка структури зразків проводилася при збільшеннях $\times 50$ і $\times 100$ спеціальною цифровою камерою, що входила в комплекс мікроскопу.

Коефіцієнт технологічної пошкоженості бетонів по площі $K_{\text{п}}$ ($\text{см}/\text{см}^2$) визначався як відношення суми довжин проявлених на зразку в межах прийнятої ділянки поверхневих тріщин (T_0) до площі цієї ділянки (S) [59, 142]:

$$K_{\text{п}}(\text{см}/\text{см}^2) = \frac{\sum T_0}{S} \quad (2.1)$$

Проявлення технологічних тріщин здійснювалося за рахунок експонування зразків бетону в розчині таніну (запареної дубової кори). Для покращення точності вимірювання довжини виявлених поверхневих технологічних тріщин їх довжина визначалася методом наведення векторної кривої по цифрових фотографіях.

При проведенні експериментальних досліджень і аналізі їх результатів застосовувалися методики планування експерименту і експериментально-статистичного моделювання [143-146].

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

$$x_i = \frac{X_i - \frac{X_{i,\max} + X_{i,\min}}{2}}{\frac{X_{i,\max} - X_{i,\min}}{2}} \quad (2.2)$$

Для розрахунку і статистичного аналізу ЕС-моделей впливу складу досліджених бетонів і сумішей на їх фізико-механічні властивості використовувалася діалогова система (програма) COMPEX, яка розроблена в Одеській державній академії будівництва та архітектури науковцями наукової школи проф. В.А. Вознесенського [143, 147, 148].

Розрахунки ЕС-моделей проводилися з урахуванням прийнятої помилки експерименту при двосторонньому ризику 10%, тобто $\alpha=0,1$. Для заданого рівня ризику здійснювалася перевірка гіпотези про відмінність оцінок коефіцієнтів ЕС-моделей від нуля, тобто перевірялася значимості коефіцієнтів. Для перевірки гіпотези про рівність розрахованих коефіцієнтів b_i нулю використовувався критерій Гаусовим точності. Коефіцієнти, які не були значущими, тобто за результатами перевірки не відрізнялись від нуля, послідовно виключалися з ЕС-моделі і модель автоматично розраховувалася без даних коефіцієнтів. Після послідовно проведеного аналізу ЕС-модель з усіма значущими оцінками коефіцієнтів перевірялася на адекватність за критерієм Фішера F . Якщо критерій Фішера був менше критичного для заданого ризику з урахуванням отриманого числа ступенів свободи, тобто $F_a < F_{кр}(\alpha, f_{на}, f_3)$, то ЕС-модель приймалася для інженерних рішень і аналізу. При записи поліномів ЕС-моделей на місці скорочених елементів записувався коефіцієнт, рівний нулю, тобто ± 0 .

2.3 План проведених досліджень і варійовані в експерименті фактори

При дослідженні структури і властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів за оптимальним планом проводився 4-х факторний експеримент [143, 145, 149], в якому варіювалися наступні фактори складу бетону:

X_1 – кількість портландцементу ПЦ II/A-III-500, від 400 до 500 кг/м³;

X_2 – кількість поліпропіленової фібри, від 0 до 2 кг/м³;

X_3 – кількість метакаоліну, від 0 до 30 кг/м³;

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

Фактор X_1 (кількість портландцементу) був обраний виходячи з того, що витрата в'язучого суттєво впливає на структуру і отже всі властивості композиту. При цьому вплив модифікаторів і дисперсного армування для бетонів з різним вмістом в'язучого може відрізнятися. Крім того, для дорожніх покриттів використовуються бетони різної міцності. Отже варіювання кількості портландцементу дозволило вивчати структуру, міцність і довговічність бетонів з більш широким спектром застосування. Діапазон варіювання фактору був прийнятий з врахуванням можливості отримання бетонів високої міцності, зокрема у ранні строки твердіння.

Фактор X_2 (кількість поліпропіленової фібри) був введений до плану експерименту для можливості дослідження і порівняння структури і властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів і фібробетонів з різною кількістю волокон. Відомо, що дисперсне армування є ефективним методом покращення ряду властивостей, що є визначальними з позиції забезпечення довговічності бетонів в типових для жорстких дорожніх покриттів умовах експлуатації [104, 112, 116, 118]. Тип фібри, а саме поліпропіленова, було обрано з врахуванням стійкості волокон до корозії, що важливо для забезпечення довговічності та запобігання відшарувань фібробетону у верхньому шарі дорожнього покриття. Діапазон варіювання фактору був

прийнятий з врахуванням рекомендацій виробника фібри і результатів попередніх експериментів.

Фактор X_3 (кількість метакооліну) був введений до плану експерименту для оцінки впливу активної мінеральними добавками пуцоланового типу на структуру і властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів. Метаколін на сьогодні є найбільш доступною і одночасно достатньо якісною добавкою пуцоланового типу на ринку України [64]. Як показано у п.1.2, пуцолани активно впливають на структуру бетону, за рахунок чого дозволяють ефективно керувати властивостями матеріалу, зокрема міцністю та морозостійкістю. Діапазон варіювання фактору був прийнятий з врахуванням аналізу технічної літератури і даних попередніх експериментів.

Фактор X_4 (кількість добавки Coral ExpertSuid-5) був обраний для визначення впливу кількості даного комплексного модифікатору (суперпластифікатору у поєднанні з прискорювачем твердіння) на структуру і властивості бетонів і фібробетонів з різною кількістю в'язучого, фібри і пуцолани. Крім того, з позиції покращення різних властивостей бетону раціональна кількість модифікатору може бути різною і має бути визначена за результатами проведення планованого експерименту. Діапазон варіювання фактору був прийнятий з врахуванням рекомендацій виробника добавки і результатів попередніх експериментів.

План 4-х факторного експерименту і склади досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів наведені у таблиці 2.3.

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

План експерименту і складу досліджених бетонів
і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів

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

Всі суміші досліджених в експериментах бетонів і фібробетонів мали рівну рухомість P2 (ОК від 6 до 8 см), що досягалося підбором кількості води. Така рухомість була обрана з врахуванням найбільш розповсюджених вимог до бетонних сумішей жорстких дорожніх покриттів.

Висновки за 2-м розділом

1. Наведені основні характеристики використаних в дослідженнях матеріалів для приготування бетонів: портландцементу, щебеню, піску, добавки комплексної дії, метакаоліну, поліпропіленової фібри.

2. Описані методи досліджень фізико-механічних властивостей і структури бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів, а також обробки отриманих даних.

3. Наведено варійовані в експериментальних дослідженнях фактори складу бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів, обґрунтовано їх вибір і діапазони варіювання.

4. Наведено план проведення експериментів та склади досліджених бетонів і фібробетонів.

6. Прийняті методи проведення досліджень і використані в дослідженнях матеріали дають можливість вирішити поставлені завдання та досягнути мети роботи.

РОЗДІЛ 3

МІЦНІСТЬ МОДИФІКОВАНИХ БЕТОНІВ І ФІБРОБЕТОНІВ В РІЗНОМУ ВІЦІ

3.1 Вплив складу бетону на В/Ц сумішей рівної рухомості

Як було вказано у п.2.3, суміші всіх досліджених в експериментах бетонів мали рівну рухомість P2 (ОК від 6 до 8 см), що досягалося підбором кількості води. Таке значення рухомості було обрано з врахуванням найбільш розповсюджених вимог до бетонних сумішей жорстких дорожніх покриттів. Відповідно водопотреба і В/Ц сумішей залежали від складу бетону. Рівні В/Ц сумішей у 18-ти точках планованого експерименту наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

В/Ц досліджених бетонних сумішей

№	В/Ц		№	В/Ц
1	0,406		10	0,406
2	0,471		11	0,478
3	0,474		12	0,455
4	0,336		13	0,398
5	0,361		14	0,484
6	0,384		15	0,396
7	0,455		16	0,366
8	0,358		17	0,469
9	0,364		18	0,408

За наведеними у таблиці 3.1 даними була побудована експериментально-статистична (ЕС) модель [145, 148] впливу факторів складу на В/Ц бетонних сумішей жорстких дорожніх покриттів рівної рухомості:

$$\begin{aligned}
 \text{В/Ц} = & 0,396 - 0,043x_1 + 0,015x_1^2 - 0,010x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \\
 & + 0,021x_2 - 0,013x_2^2 - 0,008x_2x_3 + 0,004x_2x_4 \\
 & + 0,009x_3 \pm 0x_3^2 - 0,010x_3x_4 \\
 & - 0,018x_4 + 0,009x_4^2
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Поле властивостей [145] ЕС-моделі (3.1) показує мінімальне значення $\text{В/Ц}_{\min} = 0,332$ у точці з координатами $x_1 = x_4 = 1$, $x_2 = x_3 = -1$, тобто при максимальній кількості цементу, без фібри і метакаоліну, та при максимальній кількості добавки Coral. Максимальне $\text{В/Ц}_{\max} = 0,497$ спостерігається для сумішей у точці з координатами $x_1 = x_4 = -1$, $x_2 = 0,72$, $x_3 = 1$, тобто при мінімальні кількості цементу і добавки Coral ExpertSuid-5, при введенні максимальної кількості метакаоліну та кількості пропіленової фібри, близької до максимальної.

За ЕС-моделлю (3.1) були побудовані показані на рис.3.1 однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів на В/Ц сумішей в зонах екстремумів, тобто проходять через максимальне (червоні лінії) і мінімальне (сині лінії) значення [143, 148]. При побудові даних графіків рівні трьох не відображених на кожному з них факторів фіксувалися на значеннях, що забезпечують відповідно максимальне і мінімальне значення В/Ц суміші.

Аналіз наведених на рис.3.1 діаграм показує, що при підвищенні кількості портландцементу В/Ц сумішей очікувано знижується. Введення поліпропіленової фібри викликає необхідність підвищення В/Ц для збереження необхідної рухомості суміші. За рахунок додаткової водопотреби метакаоліну при введенні даної активної мінеральної добавки В/Ц суміші також зростає. Так за рахунок введення максимальної кількості метакаоліну В/Ц зростає на 8..9%.

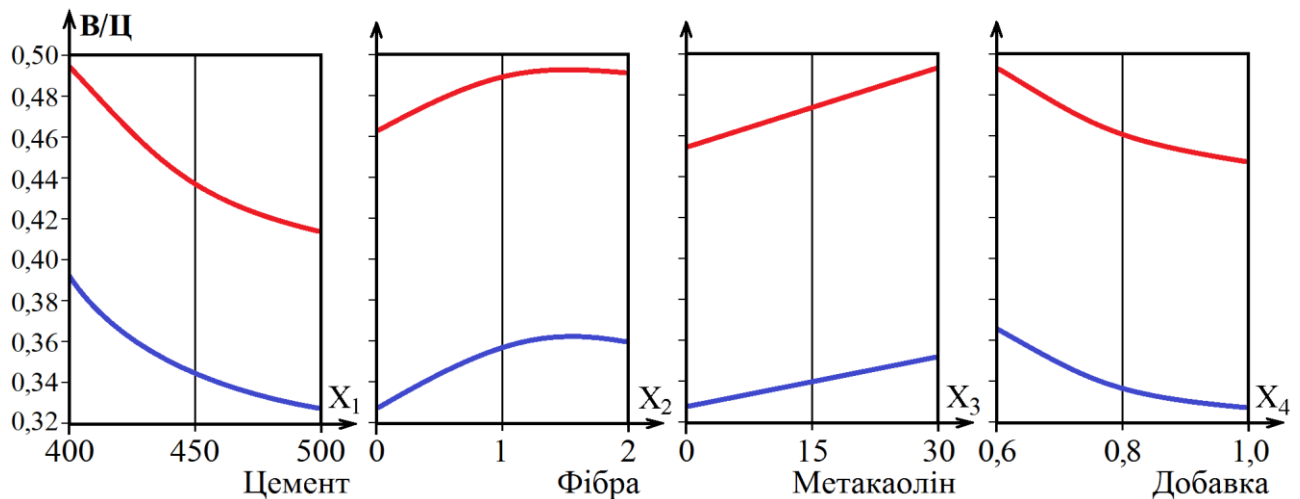


Рис.3.1. Вплив варійованих факторів складу на В/Ц бетонних сумішей рівної рухомості в зонах екстремумів

Підвищення кількості добавки Coral ExpertSuid-5 з 0,6 до 0,8% від маси цементу відчутно, на 10..12%, знижує В/Ц суміші. Зростання кількості даної добавки комплексної дії до 1% викликає подальше, але менш відчутне, зниження В/Ц.

В цілому досліджені суміші при використанні підвищеної кількості добавки Coral ExpertSuid-5 (суперпластифікатора) та при обмеженні до 20 кг/м³ кількості метакаоліну мають В/Ц не вище 0,40, що дозволяє використовувати їх для жорстких дорожніх покриттів.

3.2 Міцність на стиск досліджених фібробетонів у різному віці

Міцність на стиск бетонів жорстких дорожніх покриттів є їх основною характеристикою [9], що регламентується, зокрема, ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» та галузевими будівельними нормами ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування» [150]. Саме цей показник якості бетону вважається визначаючим його модуль пружності, та відповідно роботу в складі дорожнього одягу.

Визначені у натурному експерименті значення міцності на стиск досліджених бетонів і фібро бетонів жорстких дорожніх покриттів у 18-ти точках планованого експерименту у віці 3-х, 7-ми, 28-ми і 180-ти діб наведені у таблиці 3.2.

ЕС-моделі, побудовані за наведеними у таблиці 3.2 даними і які описують вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск досліджених бетонів і фібро бетонів жорстких дорожніх покриттів у ранньому віці, 3-х діб ($f_{ck.cube.3}$) і 7-ми діб ($f_{ck.cube.7}$) мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 f_{ck.cube.3}(\text{МПа}) = & 40,9 + 5,8x_1 - 1,7x_1^2 + 0,8x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \\
 & - 0,4x_2 + 0,9x_2^2 \pm 0x_2x_3 - 0,6x_2x_4 \\
 & + 2,1x_3 - 0,8x_3^2 + 1,0x_3x_4 \\
 & + 3,0x_4 - 1,1x_4^2
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
 f_{ck.cube.7}(\text{МПа}) = & 45,4 + 5,7x_1 - 1,5x_1^2 + 1,1x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,8x_1x_4 \\
 & - 0,9x_2 + 1,2x_2^2 \pm 0x_2x_3 - 0,6x_2x_4 \\
 & + 2,0x_3 - 1,7x_3^2 + 0,7x_3x_4 \\
 & + 3,2x_4 - 1,2x_4^2
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Аналіз полів ЕС-моделей (3.2) і (3.3) показує, що мінімальну міцність у віці 3-х діб $f_{ck.cube.3.min} = 27,3$ МПа мають склади бетонів у точці з координатами $x_1 = x_3 = x_4 = -1$, $x_2 = 0,41$. У віці 7-м діб найменша міцність бетону на стиск $f_{ck.cube.7.min} = 30,8$ МПа спостерігається у точці з близькими координатами $x_1 = x_3 = x_4 = -1$, $x_2 = 0,56$. Це відповідає складам з мінімальною кількістю цементу і добавки Coral, без метакаоліну та з кількістю фібри 1,3..1,5 кг/м³.

Максимальну міцність на стиск у віці 3-х діб $f_{ck.cube.3.max} = 50,5$ МПа мають бетони у точці з координатами $x_1 = x_3 = x_4 = 1$, $x_2 = -1$. У віці 7-м діб найбільшу міцність $f_{ck.cube.7.max} = 55,2$ МПа мають бетони у точці також з близькими координатами $x_1 = x_4 = 1$, $x_2 = -1$, $x_3 = 0,69$. Тобто у віці 3-х і 7-ми діб найбільшу міцність на стиск мають бетони при максимальній кількості цементу і добавки

Coral та без фібри. У віці 3-х діб максимальна міцність спостерігається при кількості метакаоліну 30 кг/м^3 , у віці 7-ми діб – $24..25 \text{ кг/м}^3$.

Таблиця 3.2

Міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів
жорстких дорожніх покриттів у різному віці

№	Міцність на стиск (МПа)			
	у віці 3-х діб, $f_{\text{ck.cube.3}}$	у віці 7-ми діб, $f_{\text{ck.cube.7}}$	у віці 28-ми діб, $f_{\text{ck.cube}}$	у віці 180-ти діб, $f_{\text{ck.cube.180}}$
1	41,2	45,3	59,4	69,4
2	31,6	36,6	49,3	56,3
3	30,7	33,2	45,2	51,9
4	44,1	49,8	66,1	76,9
5	49,8	53,9	65,0	77,6
6	41,1	43,0	54,4	64,3
7	36,5	39,6	51,1	61,8
8	36,5	41,2	54,8	62,3
9	47,7	51,2	65,4	75,5
10	42,6	45,4	55,5	63,8
11	27,4	31,2	41,8	47,9
12	36,3	38,6	49,1	56,0
13	39,8	43,6	56,6	63,4
14	29,6	34,3	46,3	52,8
15	39,1	45,2	60,9	67,8
16	46,6	50,5	65,2	74,5
17	36,1	39,3	51,1	57,5
18	31,2	36,4	49,4	58,3

За ЕС-моделями (3.2) і (3.3) побудовані показані на рис.3.2 однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів на ранню міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів в зонах екстремумів.

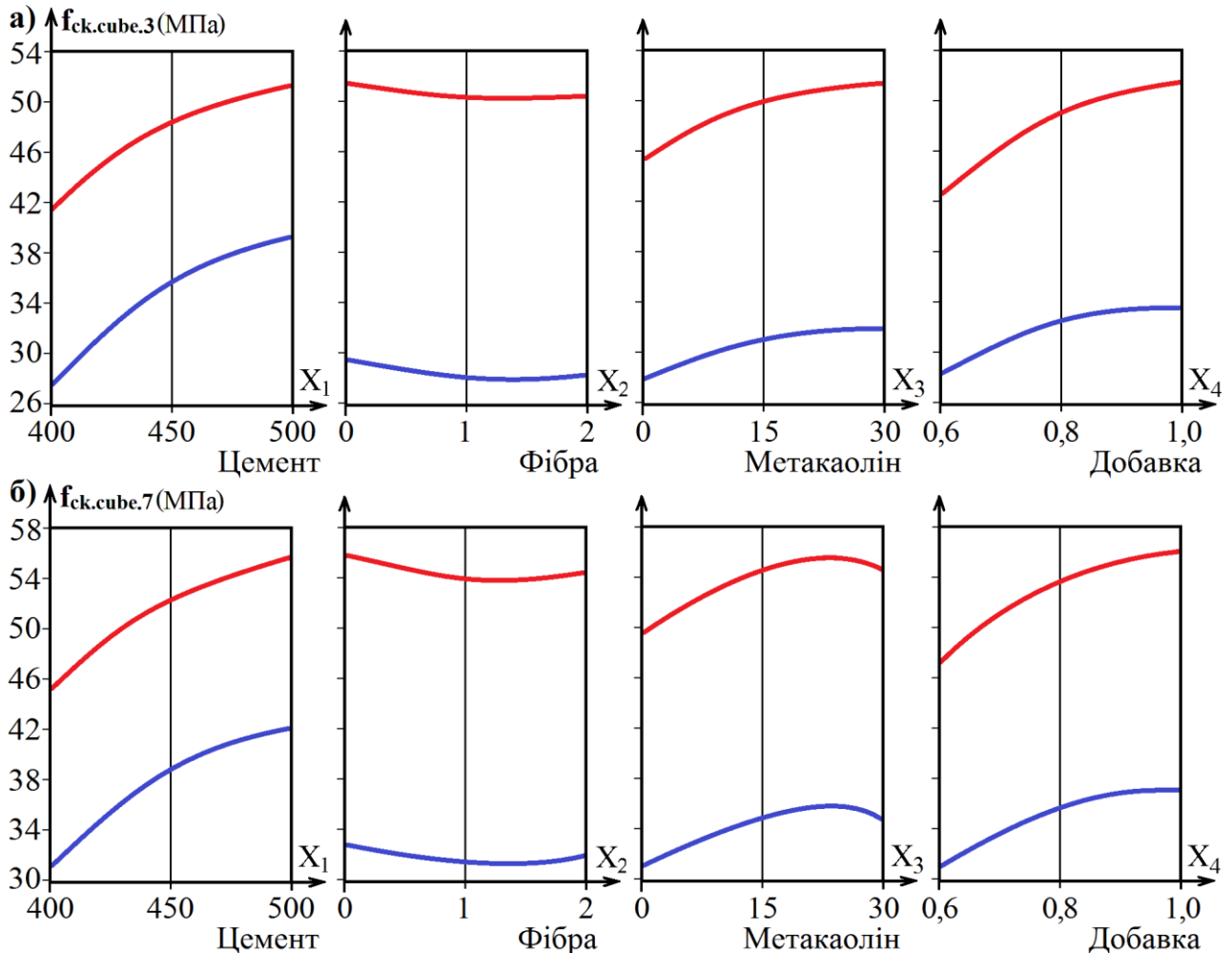


Рис.3.2. Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів у віці 3-х діб (а) і у віці 7-ми діб (б)

Аналіз наведених на рис.3.2 діаграм показує, що бетони, модифіковані метакаоліном у кількості 20-25 кг/м³ та з підвищеною до 0,9% кількістю добавки комплексної дії мають високу міцність у віці 3-х діб (рис.3.2.а) та 7-ми діб (рис.3.2.б). Досягнутий у віці 3-х діб рівень міцності, тобто від 42 МПа до 50 МПа в залежності від кількості портландцементу, вже є достатнім для початку експлуатації для доріг різних технічних категорій. При цьому кількість

поліпропіленової фібри у складі несуттєво впливає на ранню міцність досліджених бетонів на стиск, тобто як на міцність у віці 3-х діб, так і на міцність у віці 7-ми діб.

Відсутність впливу кількості фібри на міцність бетону на стиск є досить відомим фактом, який встановлено у багатьох дослідженнях [95, 151, 152]. Метою застосування дисперсного армування в даній роботі, як описано вище, було покращення ряду інших показників якості, важливих для матеріалу дорожнього покриття. Відповідно на рис.3.3 наведені побудовані за ЕС-моделями (3.2) і (3.3) діаграми у вигляді кубів, які відображають вплив кількості портландцементу, метакаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність досліджених бетонів на стиск у віці 3-х і 7-ми діб.

Аналіз наведених на рис.3.3 діаграм показує, що при підвищенні кількості цементу у складі бетону його міцність очікувано зростає, але даний вплив є дещо нелінійним як у віці 3-х діб, так і у віці 7-ми діб. Тобто при підвищенні кількості в'язучого з 400 до 450 кг/м³ міцність на стиск композитів зростає інтенсивніше, ніж при підвищенні кількості в'язучого з 450 до 500 кг/м³.

Метакаолін як активна мінеральна добавка впливає на процеси структуроутворення, що сприяє підвищенню міцності бетонів як в ранньому віці, так і в марочному. При цьому раціональною з позиції досягнення максимальної міцності у віці 3-х діб є кількість метакаоліну 30 кг/м³, а у віці 7-ми діб – 24..25 кг/м³.

При підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral як за рахунок зниження В/Ц суміші, так і за рахунок дії добавки як прискорювача твердіння рання міцність бетонів зростає, при цьому більш відчутно позитивний вплив добавки проявляється для бетонів і фібробетонів з метакаоліном.

В цілому за рахунок використання раціональної кількості модифікаторів міцність досліджених бетонів і фібробетонів у віці 3-х діб в залежності від кількості цементу у їх складі досягає 40-50 МПа, у віці 7-ми діб - від 45 до 55 МПа. Тобто за рахунок використання модифікаторів бетони мають

підвищену ранню міцність, що, як зазначено вище, дозволяє прискорювати терміни початку експлуатації дорожнього покриття.

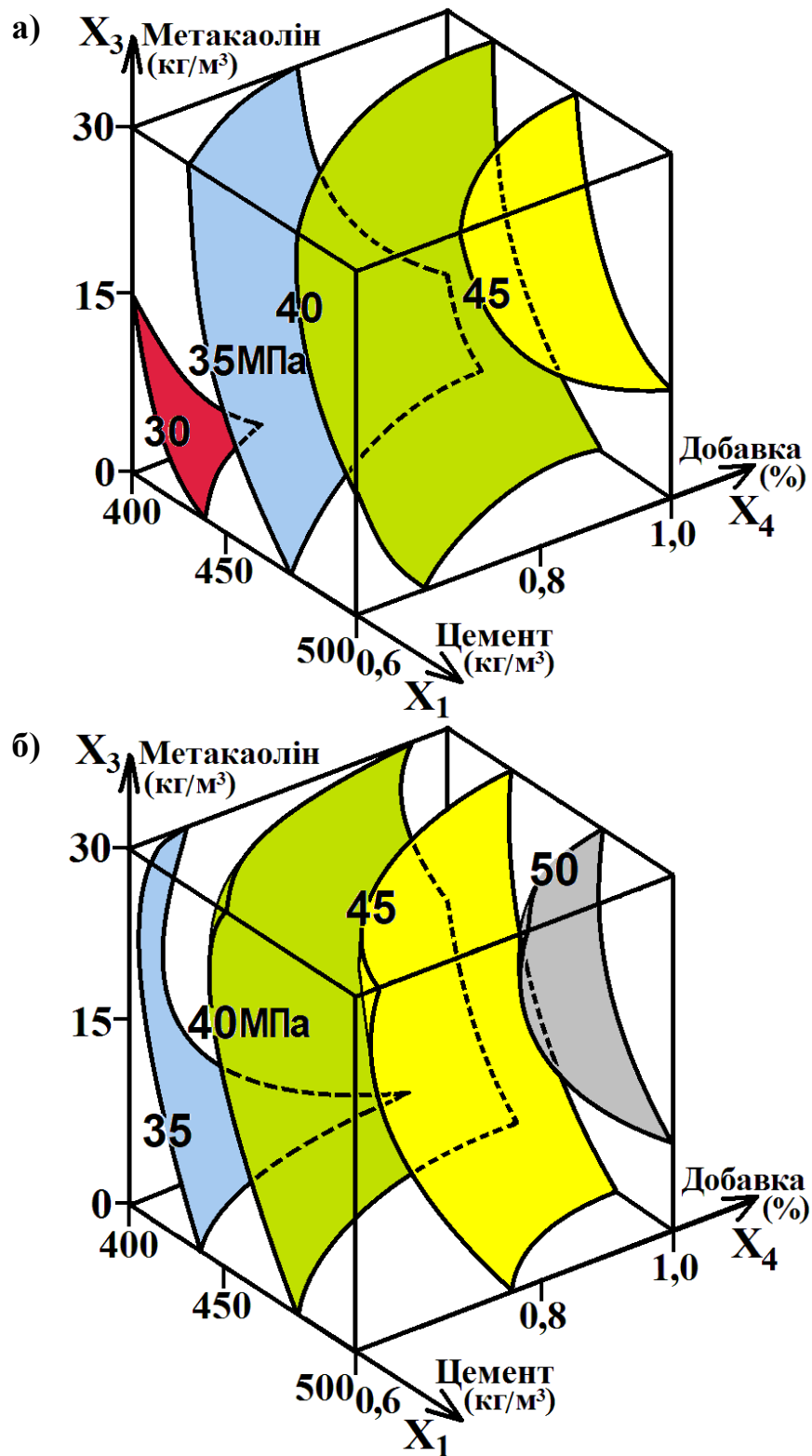


Рис.3.3. Вплив кількості портландцементу, метакаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність фібробетонів на стиск у віці 3-х діб (а) і у віці 7-ми діб (б) ($x_2=0$)

Міцність бетону у віці 28-ми діб можна назвати міцністю у «стандартному» віці, тому що саме ця міцність визначає клас бетону або його марку за міцністю. Мінімальний клас бетону для дорожніх покриттів задається відповідними нормативними документами. Через це саме міцність на стиск у віці 28-ми діб в значній мірі є визначальним з позиції можливості використання бетону в тій або іншій конструкції, включаючи жорсткі дорожні покриття.

Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск досліджених бетонів і фібро бетонів жорстких дорожніх покриттів у «стандартному» віці 28-ми діб описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ck.cube}} \text{ (МПа)} = & 59,4 + 5,9x_1 - 2,4x_1^2 + 1,1x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 1,1x_1x_4 \\
 & - 2,0x_2 + 2,4x_2^2 \pm 0x_2x_3 - 1,0x_2x_4 \\
 & + 1,6x_3 - 3,1x_3^2 \pm 0x_3x_4 \\
 & + 1,5x_4 - 1,9x_4^2
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Поле властивостей даної ЕС-моделі показує мінімальну міцність $f_{\text{ck.cube.min}} = 41,3$ МПа у точці з координатами $x_1 = x_3 = x_4 = -1$, $x_2 = 0,43$, що відповідає складам з мінімальною кількістю цементу і добавки Coral ExpertSuid-5, без метаксаоліну та з кількістю фібри приблизно $1,3 \text{ кг/м}^3$. Максимальна міцність $f_{\text{ck.cube.max}} = 70,9$ МПа спостерігається у точці з координатами $x_1 = x_4 = 1$, $x_2 = -1$, $x_3 = 0,24$, що відповідає складам з максимальною кількістю цементу і добавки Coral, без фібри та з кількістю метаксаоліну $18..19 \text{ кг/м}^3$.

За ЕС-моделлю (3.4) побудовані показані на рис.3.4 однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів на міцність досліджених бетонів і фібробетонів на стиск у віці 28 діб в зонах екстремумів.

Аналіз наведених на рис.3.4 однофакторних діаграм показує, що у віці 28 діб кількість фібри у складі бетону також, як і віці 3-х і 7-ми діб, несуттєво впливає на його міцність на стиску. Відповідно рис.3.5 наведена побудована за ЕС-моделлю (3.4) діаграма у вигляді куба, що відображає вплив трьох інших факторів, а саме

кількості портландцементу, метаксаоліну і добавки Coral ExpertSuid-5, на міцність досліджених бетонів на стиск у віці 28 діб.

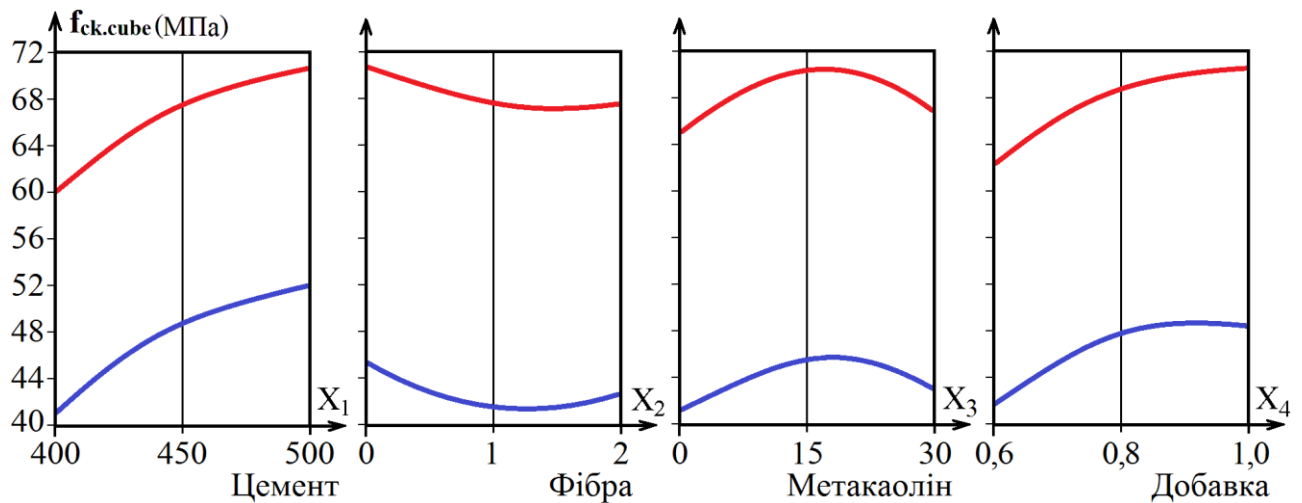


Рис.3.4. Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб в зонах екстремумів

Аналіз діаграми на рис.3.5 показує, що позитивний вплив модифікаторів, добавки Coral ExpertSuid-5 і метаксаоліну на міцність бетону зберігається і у «стандартному» 28 денному віці. У даному віці більш раціональною з точки зору забезпечення підвищеної міцності на стиск є кількість метаксаоліну в діапазоні від 18 до 22 кг/м³ та кількість добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 в діапазоні від 0,8 до 0,9 % від маси цементу.

Розроблені бетони і фібробетони при використанні раціональної кількості модифікаторів в залежності від кількості портландцементу у їх складі мають міцність на стиск від 55 МПа до 70МПа, що відповідає класам В40 (С32/40) - В50 (С40/50). Така міцність бетону є навіть дещо вищою, ніж вимагається ДБН В.2.3-4:2015 для цементобетону покриттів автомобільних доріг (В25-В35), що дозволяє розраховувати на більшу довговічність покриття. При цьому за рахунок високої ранньої міцності, що зазначено вище, розроблені бетони забезпечують можливість більш швидкого початку експлуатації доріг. Зокрема це дозволяє ефективно використовувати розроблені бетони і фібро бетони при ремонті окремих ділянок автомобільних доріг.

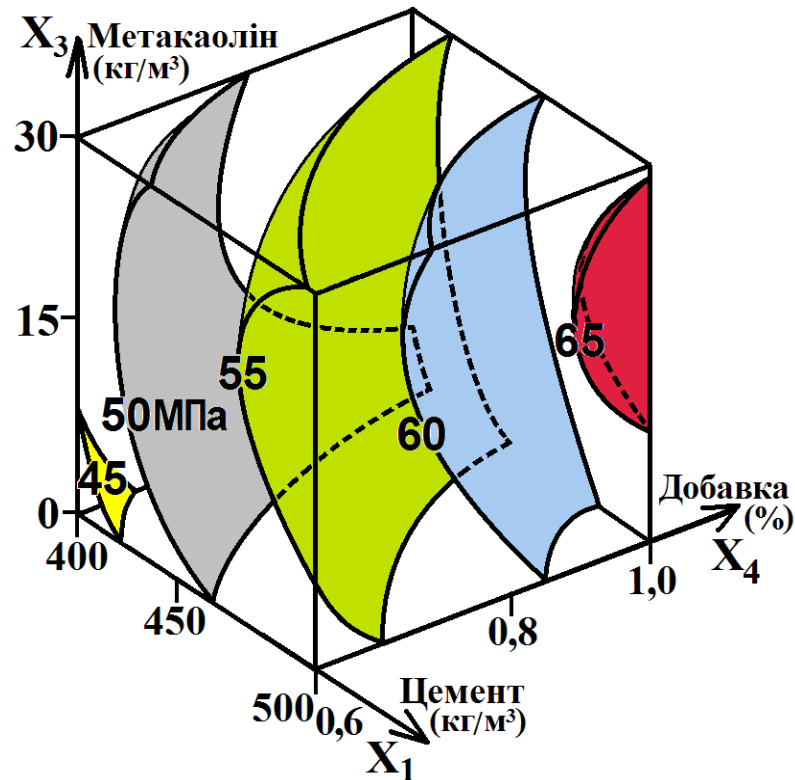


Рис.3.5. Вплив кількості портландцементу, метакаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність на стиск фібробетонів у віці 28 діб ($x_2=0$)

Відсутність позитивного впливу дисперсного армування поліпропіленовою фіброю на величину міцності бетону на стиск, зокрема у «стандартному» 28-ми денному віці, як зазначалося вище є очікуваним і відомим у матеріалознавстві ефектом. Дисперсне армування суттєво впливає на ряд інших показників якості бетону, які забезпечують довговічність та функціональність жорстких дорожніх покриттів і що показано нижче.

З точки зору аналізу довговічності і функціональності бетону жорсткого дорожнього покриття також досить важливим показником його якості є умовно «довгострокова» міцність. В рамках даних досліджень таким показником було прийнято міцність бетону у віці 180 діб, яка визначалася на зразках, що зберігалися в стандартних умовах. Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у віці 180-ти діб описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ck.cube.180}} \text{ (МПа)} = & 69,3 + 7,6x_1 - 3,7x_1^2 + 1,9x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 1,8x_1x_4 \\
 & - 1,5x_2 + 2,7x_2^2 \quad \quad \quad \pm 0x_2x_3 - 1,4x_2x_4 \\
 & + 1,6x_3 - 2,6x_3^2 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \pm 0x_3x_4 \\
 & + 4,7x_4 - 2,6x_4^2
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Поле властивостей даної ЕС-моделі має мінімальне значення $f_{\text{ck.cube.180.min}} = 48,3$ МПа у точці з координатами $x_1 = x_3 = x_4 = -1$, $x_2 = 0,39$, тобто при мінімальній кількості цементу і добавки Coral ExpertSuid-5, без метакаоліну та при кількості поліпропіленової фібри приблизно $1,4 \text{ кг/м}^3$. Максимальна міцність на стиск у віці 180 діб $f_{\text{ck.cube.180.max}} = 80,7$ МПа спостерігається для складів у точці з координатами $x_1 = x_4 = 1$, $x_2 = -1$, $x_3 = 0,28$ тобто при максимальній кількості портландцементу і добавки Coral ExpertSuid-5, без фібри та при введенні метакаоліну у кількості близько 20 кг/м^3 .

Побудовані за ЕС-моделлю (3.5) однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів у віці 180 діб в зонах екстремумів, показані на рис.3.6.

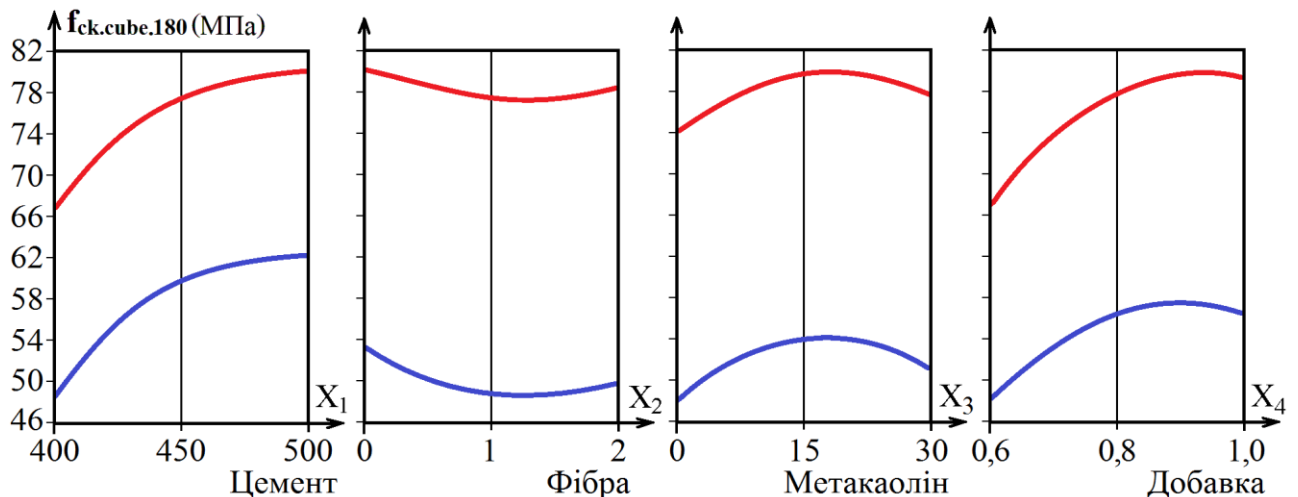


Рис.3.6. Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 180-т діб в зонах екстремумів

Як видно з показаних на рис.3.6 діаграм, у віці 180 діб варіювання кількості поліпропіленової фібри несуттєво впливає на рівень міцності бетону

на стиск, що аналогічно впливу даного фактору на міцність у віці 3,7 і 28 діб. Відповідно для більш ґрунтовного аналізу впливу кількості портландцементу, метаксаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 (як варійованих факторів складу) на міцність досліджених бетонів і фібробетонів у віці 180 діб за ЕС-моделлю (3.5) була побудована показана на рис.3.7 діаграма у формі куба.

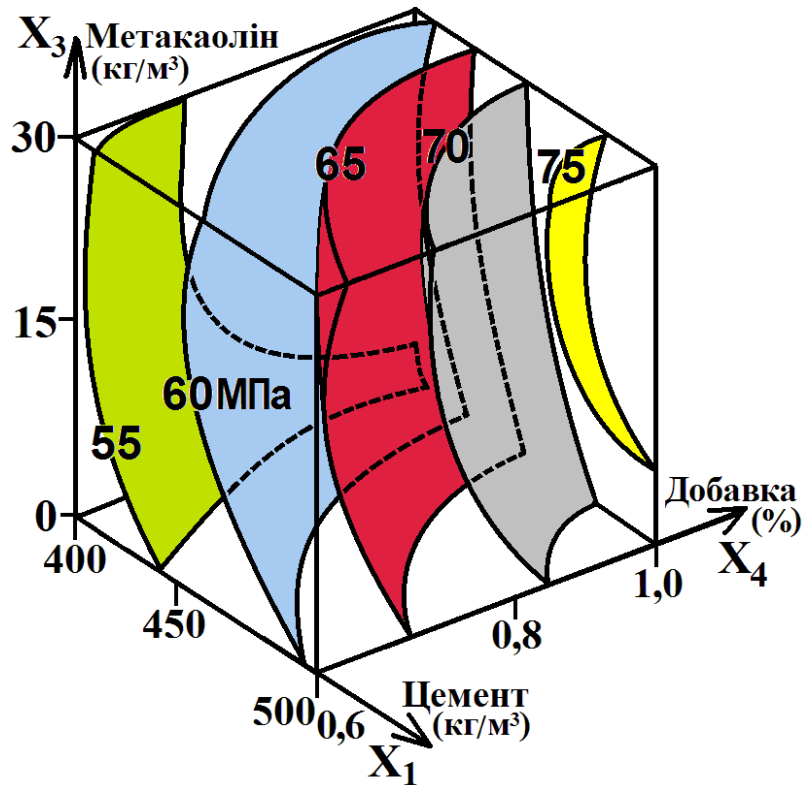


Рис.3.7. Вплив кількості портландцементу, метаксаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність фібробетонів на стиск у віці 180 діб ($x_2=0$)

Аналіз показаної на рис.3.7 діаграми дозволяє зробити висновок, що в цілому характер впливу кількості портландцементу, метаксаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність на стиск досліджених бетонів у віці 180 діб є схожим з характером впливу цих варійованих факторів складу на міцність у віці 3, 7 і 28 діб. Це пояснюється однаковим індивідуальним впливом кожного з факторів на процеси структуроутворення. Для добавки Coral ExpertSuid-5 такий схожий ефект впливу у різному віці пояснюється її

комплексною дією, тобто роботою одночасно як суперпластифікатор, який дозволяє знизити В/Ц суміші, і як прискорювач твердіння, який має позитивний вплив переважно у ранньому віці.

В цілому при підвищенні у складі кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 з 0,6% до 0,9-1% за рахунок зниження В/Ц суміші міцність бетону на стиск зростає на 7-9 МПа, при цьому позитивний вплив добавки проявляється вже у ранньому віці (3,7 діб). За рахунок введення метакаоліну у кількості 15-20 кг/м³ міцність бетонів на стиск в залежності від кількості портландцементу і віку бетону підвищується на 5-7 МПа.

Таки чином, за рахунок виростання раціональної кількості модифікаторів міцність на стиск бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів підвищується на 15-16 МПа, при цьому вже у віці 3-х діб міцність модифікованих бетонів є на 11-12 МПа більше міцності бетонів з мінімальною кількістю добавки Coral ExpertSuid-5. Це дозволяє використовувати розроблені бетони і фібробетони в покриттях доріг з найбільшим навантаженням.

3.3 Міцність досліджених бетонів на розтяг при згині у різному віці

Для бетонів дорожніх покриттів міцність на розтяг при згині фактично є більш важливим показником якості, ніж міцність на стиск. Це обумовлено різноспрямованими навантаженнями, що сприймають покриття в процесі експлуатації. Більшість відомих методів розрахунку жорстких дорожніх покриттів приймають у якості «базової» характеристики бетону його клас, який визначається за міцністю на стиск, а в подальшому з врахуванням класу використовується розрахункове значення міцності на розтяг при згині.

Визначені у натурному експерименті значення міцності на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у 18-ти точках експерименту у віці 3-х, 7-ми, 28-ми і 180-ти діб наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

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

№	Міцність на розтяг при згині (МПа)			
	у віці 3-х діб, $f_{ctk.3}$	у віці 7-ми діб, $f_{ctk.7}$	у віці 28-ми діб, f_{ctk}	у віці 180-ти діб, $f_{ctk.180}$
1	6,52	7,44	8,32	9,12
2	5,35	6,23	6,97	7,50
3	5,76	6,31	7,21	7,89
4	6,52	7,67	8,72	9,46
5	6,91	8,01	9,22	10,02
6	6,61	7,56	8,73	9,41
7	6,56	7,51	8,49	9,20
8	6,15	7,02	7,91	8,42
9	6,33	7,45	8,22	8,48
10	6,49	7,48	8,47	9,21
11	5,76	6,54	7,35	8,06
12	5,74	6,57	7,46	8,14
13	6,29	7,01	8,07	8,67
14	5,99	6,75	7,78	8,39
15	5,88	6,74	7,61	8,12
16	6,35	7,20	8,24	8,83
17	5,91	6,75	7,62	8,21
18	5,52	6,38	7,07	7,62

ЕС-моделі, побудовані за наведеними у таблиці 3.3 даними і які описують вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених

бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у віці 3-х діб ($f_{\text{ctk.3}}$) і 7-ми діб ($f_{\text{ctk.7}}$) мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ctk.3}}(\text{МПа}) = & 6,52 + 0,42x_1 - 0,25x_1^2 + 0,02x_1x_2 + 0,03x_1x_3 + 0,04x_1x_4 \\
 & + 0,27x_2 - 0x_2^2 + 0,05x_2x_3 - 0,07x_2x_4 \\
 & + 0,02x_3 - 0,15x_3^2 + 0,03x_3x_4 \\
 & + 0,08x_4 - 0x_4^2
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ctk.7}}(\text{МПа}) = & 7,48 + 0,52x_1 - 0,31x_1^2 + 0,09x_1x_2 + 0x_1x_3 + 0,10x_1x_4 \\
 & + 0,25x_2 - 0,07x_2^2 + 0,08x_2x_3 - 0,12x_2x_4 \\
 & + 0,04x_3 - 0,09x_3^2 + 0x_3x_4 \\
 & + 0,13x_4 - 0x_4^2
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Поля даних двох ЕС-моделей показують мінімальну міцність на розтяг при згині бетонів відповідно у віці 3-х діб $f_{\text{ctk.3.min}} = 5,35$ МПа і у віці 7-ми діб $f_{\text{ctk.7.min}} = 6,25$ МПа у точці в однаковими координатами $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = -1$, що відповідає складам з мінімальною кількістю цементу і добавки Coral, без метакаоліну і фібри. Максимальну міцність на розтяг при згині у віці 3-х діб $f_{\text{ctk.3.max}} = 6,96$ МПа мають склади у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_4 = 1$, $x_3 = 0,39$. У віці 7-ми діб максимальну міцність на розтяг при згині $f_{\text{ctk.7.max}} = 8,01$ МПа мають бетони у точці з близькими координатами $x_1 = x_2 = x_4 = 1$, $x_3 = 0,65$. Тобто найбільшу міцність на розтяг при згині у віці 3-х і 7-ми діб мають фібробетони при максимальній кількості портландцементу, фібри і добавки Coral, та при кількості метакаоліну 22..25 кг/м³.

За ЕС-моделями (3.6) і (3.7) побудовані однофакторні діаграми, які показані на рис.3.8 та які відображають вплив варійованих факторів складу на міцність досліджених бетонів і фібробетонів на розтяг при згині в зонах екстремумів у віці 3-х і 7-ми діб.

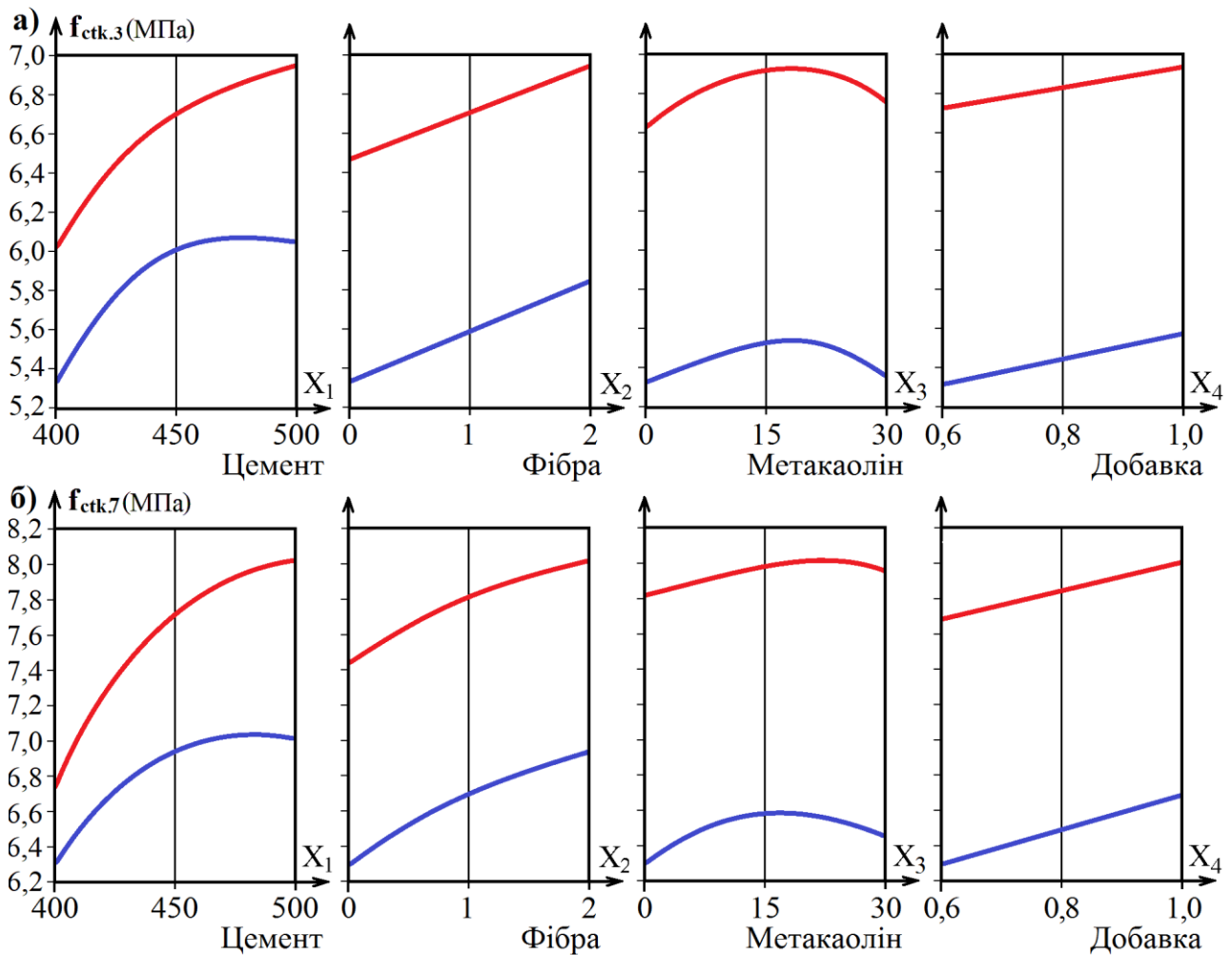


Рис.3.8. Вплив варійованих факторів складу на міцність бетонів і фібробетонів на розтяг при згині в зонах екстремумів у віці 3-х діб (а) і у віці 7-ми діб (б)

Як видно з показаних на рис.3.8 діаграм вплив кількості метакаоліну і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність бетонів на розтяг згині при у ранньому віці є аналогічним впливу даних факторів на міцність бетонів при стиску. За рахунок дисперсного армування поліпропіленовою фіброю міцність бетонів дорожніх покриттів на розтяг у ранньому віці підвищується на 0,5..0,7 МПа.

Для більш детального аналізу впливу варійованих факторів складу на міцність досліджених бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 3-х і 7-ми діб за ЕС-моделями (3.6), (3.7) були побудовані діаграми типу «квадрати на квадраті», які показані відповідно на рис.3.9.а і рис.3.9.б.

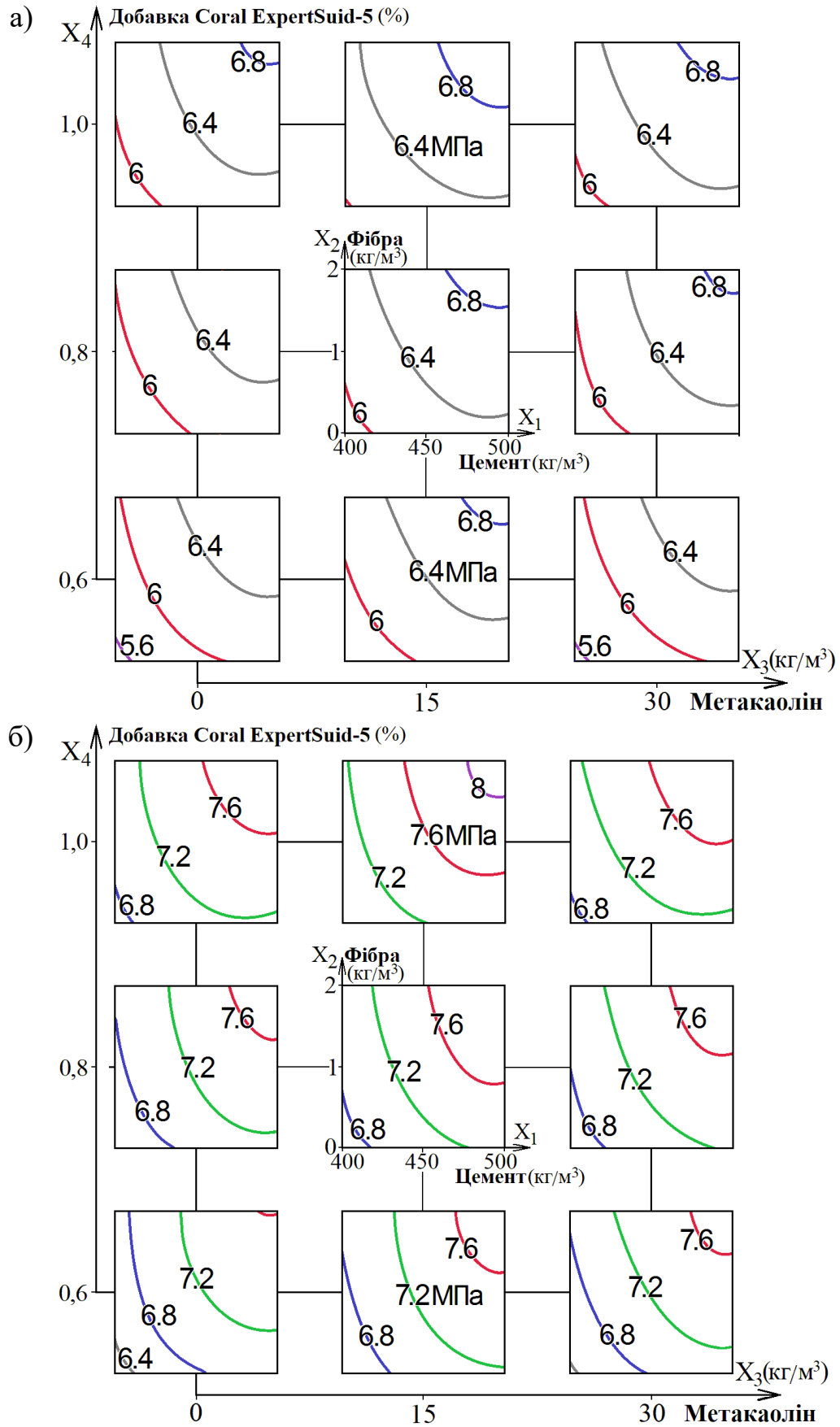


Рис.3.9. Вплив варійованих факторів складу на міцність бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 3-х діб (а) і у віці 7-ми діб (б)

При побудові діаграми у якості несучого обрано квадрат в координатах факторів x_3 - x_4 – кількість метакаооліну і добавки Coral ExpertSuid-5, тобто кількість модифікаторів. В полі несучого квадрату побудовані дев'ять квадратів, які відображають вплив кількості портландцементу і поліпропіленової фібри на міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів при відповідній кількості модифікаторів (кількість визначається координатами квадрату на несучому квадраті).

Аналіз наведених на рис.3.9 діаграм показує, що як у віці 3-х діб, так і у віці 7-ми діб незалежно від кількості модифікаторів дисперсне армування дозволяє суттєво, на 0,5..0,7 МПа підвищити міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів на розтяг при згині, що вже було вказано вище. За рахунок підвищення кількості добавки комплексної Coral ExpertSuid-5 до 0,9-1% від маси цементу міцність на розтяг досліджених бетонів зростає на 0,4..0,5 МПа у порівнянні з бетонами з кількістю добавки 0,6%. Кількість метакаооліну не оказує суттєвого впливу на величину міцності на розтяг при згині бетонів у ранньому віці, проте найбільшим рівнем f_{ctk} характеризуються склади бетонів з вістом даної мінеральної добавки приблизно 15-18 кг/м³. В цілому, при підвищеній до 0,9-1% кількості добавки Coral ExpertSuid-5 вже у віці 3-х діб міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів складає 72-80% від міцності даних бетонів у стандартному 28-ми денному віці, що дуже важливо з позиції забезпечення можливості прискореного введення дорожніх покриттів у експлуатацію.

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

$$\begin{aligned}
 f_{ctk} \text{ (МПа)} = & 8,30 + 0,61x_1 - 0,22x_1^2 + 0,07x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,10x_1x_4 \\
 & + 0,32x_2 \pm 0x_2^2 + 0,09x_2x_3 - 0,13x_2x_4 \\
 & + 0,05x_3 - 0,17x_3^2 + 0,05x_3x_4 \\
 & + 0,11x_4 + 0,09x_4^2
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Для поля властивостей ЕС-моделі (3.8) мінімальне значення, відповідно найменша в межах факторного простору експерименту міцність на розтяг при згині $f_{\text{ctk.min}} = 6,97$ МПа спостерігається у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_4 = -1$, $x_3 = 1$, що відповідає складам з мінімальною кількістю портландцементу і добавки Coral ExpertSuid-5, без фібри та з найбільшою кількістю метакаоліну. Максимальне значення міцності на розтяг при згині $f_{\text{ctk.max}} = 9,27$ МПа спостерігається у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_4 = 1$, $x_3 = 0,27$, що відповідає складам з максимальною кількістю портландцементу, поліпропіленової фібри і добавки Coral ExpertSuid-5, та з кількістю метакаоліну 19..20 кг/м³.

Побудовані за ЕС-моделлю (3.8) однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у віці 28 діб в зонах екстремумів показані на рис.3.10.

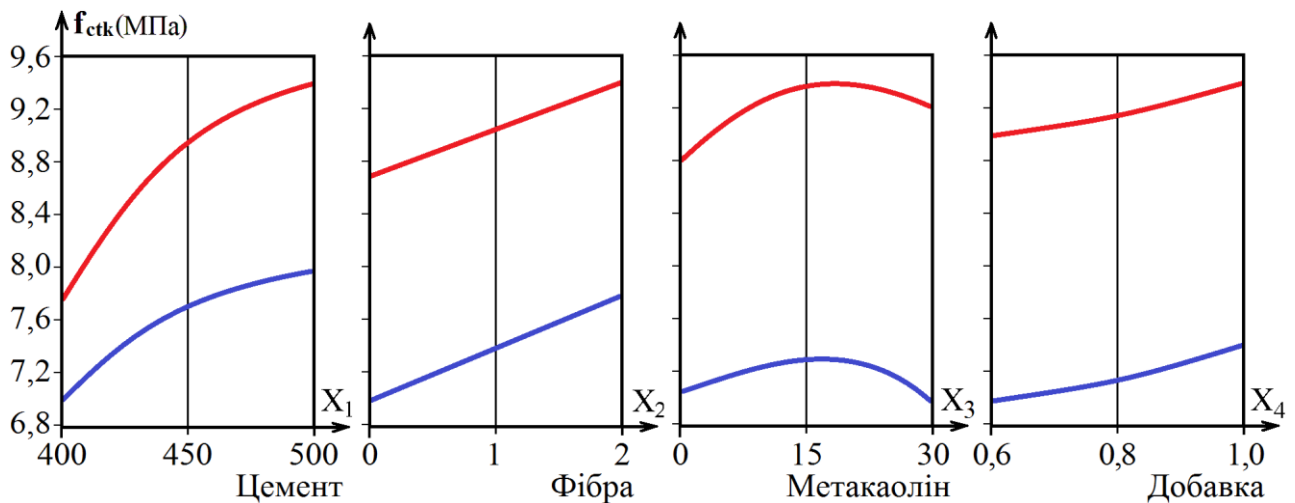


Рис.3.10. Вплив варійованих факторів складу на міцність бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 28-ми діб в зонах екстремумів

Аналіз наведених на рис.3.10 діаграм дозволяє сказати, що загальний характер впливу факторів складу, які варіюватися у експерименті, на величину міцності на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів у «стандартному» віці 28 діб є схожим з характером впливу даних факторів на міцність бетону на розтяг при згині у ранньому віці при дещо більшому впливі

кількості метакаоліну на величину f_{ctk} у «стандартному» віці. Для більш детального аналізу впливу варійованих факторів складу на міцність бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 28-ми діб за ЕС-моделлю (3.8) була побудована діаграма типу «квадрати на квадратах», що аналогічно за типом побудови показаній на рис.3.9 діаграмі та яка наведена на рис.3.11.

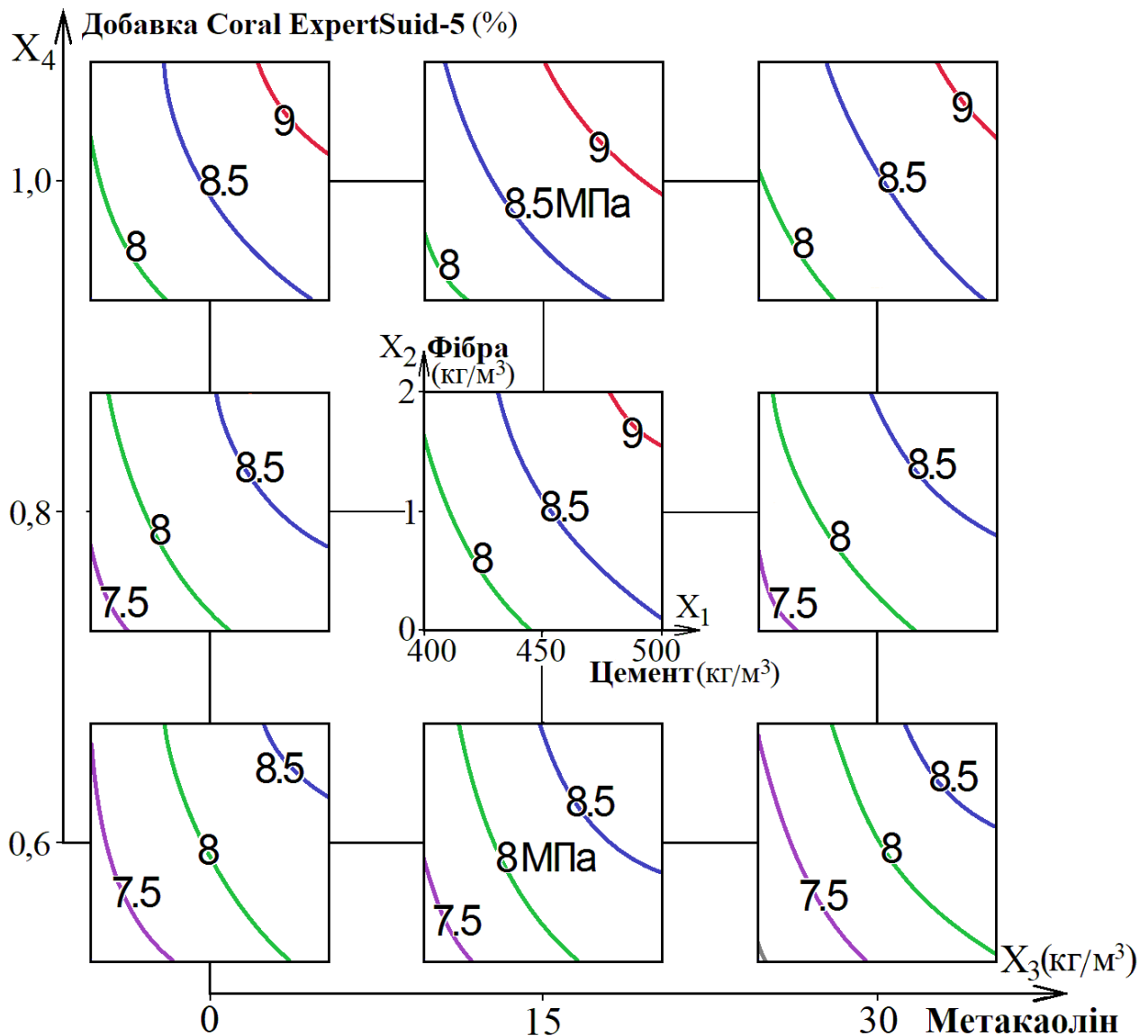


Рис.3.11. Вплив варійованих факторів складу на міцність бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 28-ми діб

Аналіз наведеної на рис.3.11 діаграми показує, що найбільше на величину міцності на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів впливає кількість портландцементу. За рахунок підвищення кількості в'язучого у

складі з 400 до 500 кг/м³ величина f_{ctk} зростає на 0,9-1,1 МПа, тобто на 12-15%. Дисперсне армування поліпропіленовою фіброю є ефективним методом підвищення стійкості бетонів до напружень розтягування. За рахунок застосування фібри у кількості 1,5-2 кг/м³ міцність на розтяг при згині бетонів жорстких дорожніх покриттів підвищується на 0,6..0,8 МПа, що пояснюється здатністю волокон сприймати напруження розтягування. При підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 до 0,9-1% завдяки зниженню В/Ц суміші та відповідним змінам структури бетону величина f_{ctk} зростає на 0,4..0,5 МПа. При використанні метакаоліну у кількості 15-20 кг/м³ міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів зростає на 0,2..0,3 МПа, тобто не дуже суттєво. Підвищення кількості активної мінеральної добавки до 30 кг/м³ вже негативно впливає на величину f_{ctk} .

В цілому дослідженні бетони при використанні раціональної кількості модифікаторів і фібри мають досить високу міцність на розтяг при згині – від 8 до 9,3 МПа в залежності від кількості цементу. Це свідчить про їх ефективність при використанні в жорстких дорожніх покриттях, зокрема на дорогах з найбільшим навантаженням.

Як зазначено вище, в рамках даних досліджень міцність бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів визначалася також у віці 180 діб, що можна умовно вважати показником міцності у «довгостроковому» віці. Вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів у віці 180-ти діб описує наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned}
 f_{ctk.180} \text{ (МПа)} = & 9,11 + 0,71x_1 - 0,16x_1^2 + 0,09x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,13x_1x_4 \\
 & + 0,31x_2 - 0,19x_2^2 + 0,13x_2x_3 - 0,10x_2x_4 \\
 & \pm 0x_3 - 0,21x_3^2 + 0x_3x_4 \\
 & + 0,15x_4 + 0,07x_4^2
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Поле властивостей ЕС-моделі (3.9) має мінімальне значення $f_{\text{ctk.180.min}} = 7,49$ МПа у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = -1$, тобто при мінімальній кількості портландцементу і добавки Coral ExpertSuid-5, без поліпропіленової фібри та метакаоліну. Максимальна міцність на розтяг при згині у віці 180 діб $f_{\text{ctk.180.max}} = 10,13$ МПа спостерігається для складів у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_4 = 1$, $x_3 = 0,26$ тобто при максимальній кількості портландцементу, добавки Coral ExpertSuid-5, поліпропіленової фібри та при введенні метакаоліну у кількості 18-19 кг/м³.

За ЕС-моделлю (3.9) побудовані однофакторні діаграми, які показані на рис.3.12 та які відображають вплив варійованих факторів складу на міцність досліджених бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 180 діб в зонах екстремумів.

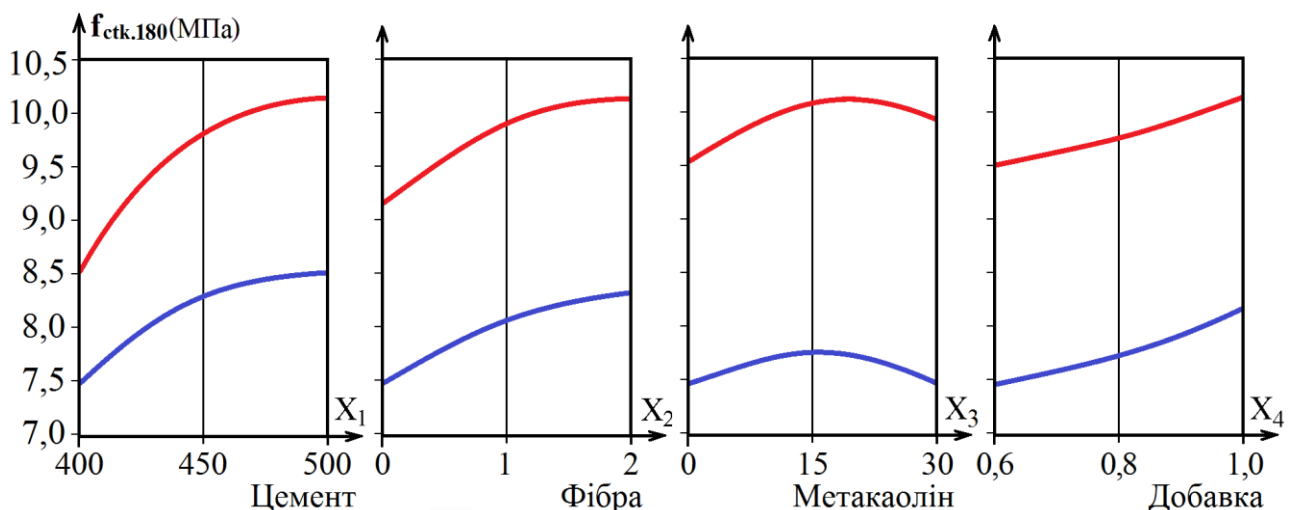


Рис.3.12. Вплив варійованих факторів складу на міцність бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 180-ти діб в зонах екстремумів

Аналіз наведених на рис.3.12 діаграм і ЕС-моделі (3.9) показує, що міцність досліджених бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 180-ти діб була вище за міцність у стандартному 28-ми денному віці на 7,5..9%. Тобто міцність на розтяг при згині бетонів з віком зростає менш відчутно, ніж міцність на стиск. Цей ефект є досить відомим у бетонознавстві та пояснюється

тим, що з віком композит стає також більш крихким, що впливає в першу чергу на міцність на розтяг при згині.

Для детальнішого аналізу впливу варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів у віці 180-ти діб за ЕС-моделлю (3.9) була побудована наведена на рис.3.13 діаграма типу «квадрати на квадратах», що аналогічно за типом показаним на рис.3.9 і рис.3.11.

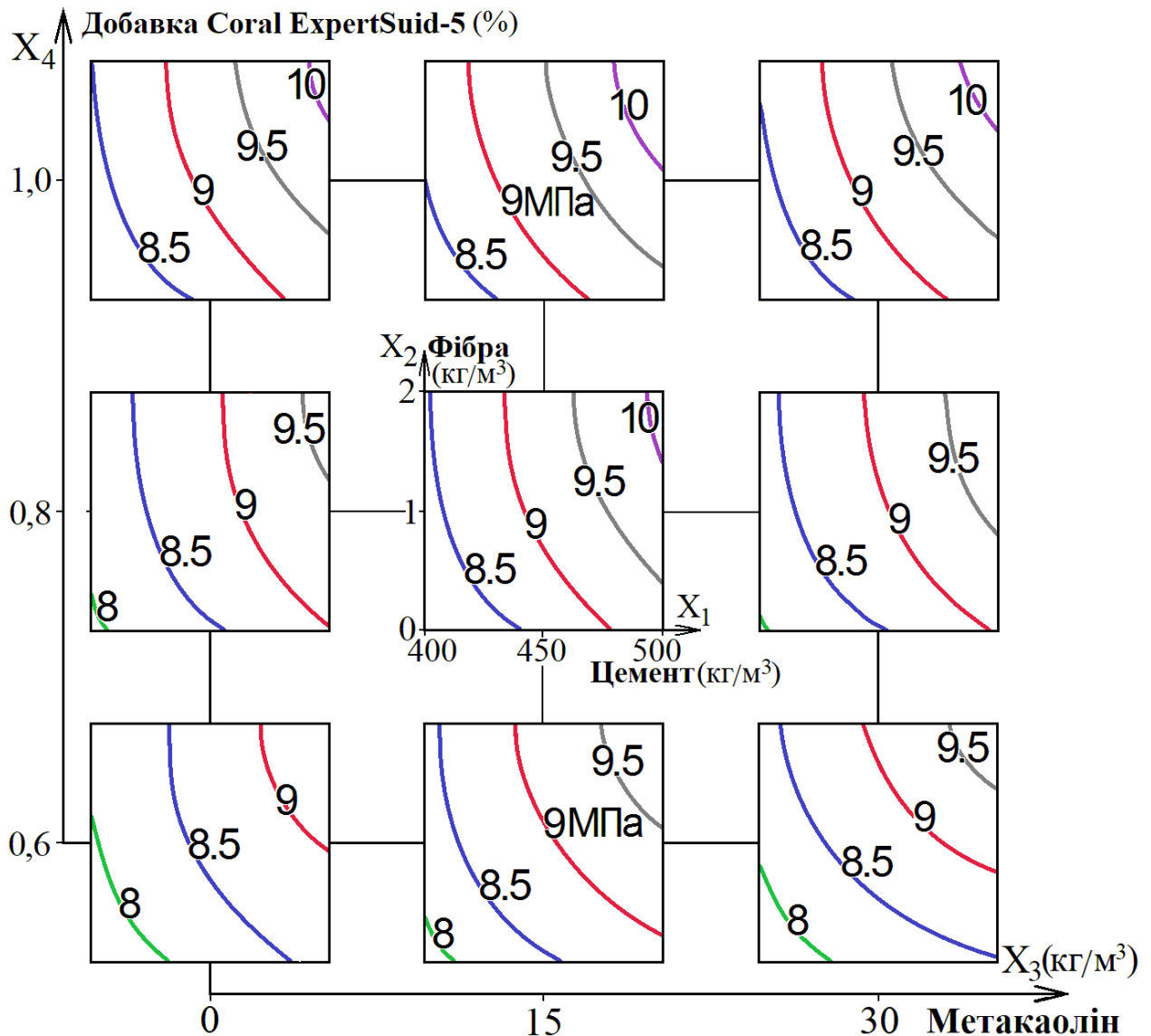


Рис.3.13. Вплив варійованих факторів складу на міцність бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 180-ти діб

Аналіз діаграми на рис.3.13 дозволяє сказати, що загальний характер впливу варійованих факторів на величину міцності на розтяг при згині

досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у віці 180-ти діб є досить близьким до характеру їх впливу на величину міцності у віці 28-ми діб. За рахунок підвищення кількості портландцементу з 400 до 500 кг/м³ величина $f_{ctk.180}$ зростає на 1-1,3 МПа. При введенні раціональної кількості метакаоліну (16-20 кг/м³) міцність на розтяг при згині у віці 180 діб зростає приблизно на 0,5 МПа. За рахунок підвищення кількості добавки Coral ExpertSuid-5 величина $f_{ctk.180}$ зростає на 0,5-0,6 МПа. За рахунок дисперсного армування фіброю (при застосуванні волок у кількості 1,5-2 кг/м³) міцність на розтяг при згині у віці 180 діб досліджених фібробетонів жорстких дорожніх покриттів зростає на 0,7-0,9 МПа, тобто у середньому на 10%.

В цілому проведені дослідження впливу варійованих факторів складу на властивості бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у різному віці показали, що за рахунок використання комплексної модифікації та дисперсного армування міцність на розтяг при згині даних бетонів суттєво підвищується: на 0,9..1,0 МПа у віці 3-х діб, на 1,0..1,3 МПа у віці 7-ми діб, на 1,2..1,4 МПа у віці 28-ми діб і на 1,3..1,6 МПа у віці 180-ти діб. При цьому раціональною з точки зору забезпечення підвищеної міцності на розтяг при згині є кількість фібри в діапазоні 1,5..2 кг/м³, кількість добавки Coral ExpertSuid-5 в діапазоні 0,9..1,0% від маси цементу і кількість метакаоліну в діапазоні 15..20 кг/м³.

3.4 Врахування зміни Ц/В суміші при оцінці впливу складу модифікованого бетону на його міцність

Виходячи з умов експерименту, а саме забезпечення рівної рухомості, в сумішах досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів змінювалося В/Ц, відповідно і зворотна величина – цементно-водне відношення (Ц/В). Це вплинуло практично на всі властивості матеріалу і в першу чергу – на міцність бетонів. Відповідно бажано чітко врахувати вплив Ц/В як

структурного фактора в комплексі з варійованими за планом факторами складу для більш об'єктивного виявлення даного впливу [153].

У таблиці 3.4 показана розрахована ступінь взаємозв'язку величин міцності на стиск і міцності на розтяг при згині досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів (у марочному віці) з Ц/В бетонної суміші. З неї випливає, що гіпотезу про лінійний зв'язок між Ц/В відношенням суміші і міцністю бетону можна припустити з ризиком не більше 1%.

Таблиця 3.4

Взаємозв'язок Ц/В бетонної суміші і міцності бетонів

Показник	Міцність на стиск $f_{ck.cube}$ (МПа)	Міцність на розтяг при згині f_{ctk} (МПа)
Діапазон змін	41,8...66,1	6,97 - 9,22
Коефіцієнт кореляції $r\{Ц/В, Y\}$	0,872	0,647
Кореляційна модель $Y\{Ц/В\}$	$1,65+21,85 \times Ц/В$	$4,658+1,361 \times Ц/В$
Діапазон абсолютних залишків від кореляційної моделі ΔY	-7,89...4,07	-0,924...0,860

На рис.3.14 проілюстрована залежність міцності на стиск і міцності на розтяг при згині бетону від Ц/В відношення і відображені прямі лінійних кореляційних моделей $Y\{Ц/В\}$, наведених у таблиці 3.4. Точність прогнозу міцності бетону за кореляційною моделлю $Y\{Ц/В\}$ в кожній експериментальній точці можна охарактеризувати абсолютними відхиленнями $\Delta\{Y\}$ – різницею між експериментальним значенням міцності та розрахунковим, тобто $\Delta\{Y\} = Y_{експ} - Y_{розн}$ [153]. Також існує метод оцінки точності прогнозу відносними залишками $\eta\{Y\}$ [154], але абсолютні відхилення мають розмірність, яка співпадає з розмірністю показника якості (в даному випадку – в МПа), за рахунок чого є більш зручними для аналізу [155]. Такий метод аналізу властивостей бетону з врахуванням впливу факторів на Ц/В суміші був запропонований в роботах В.А. Вознесенського [154, 156].

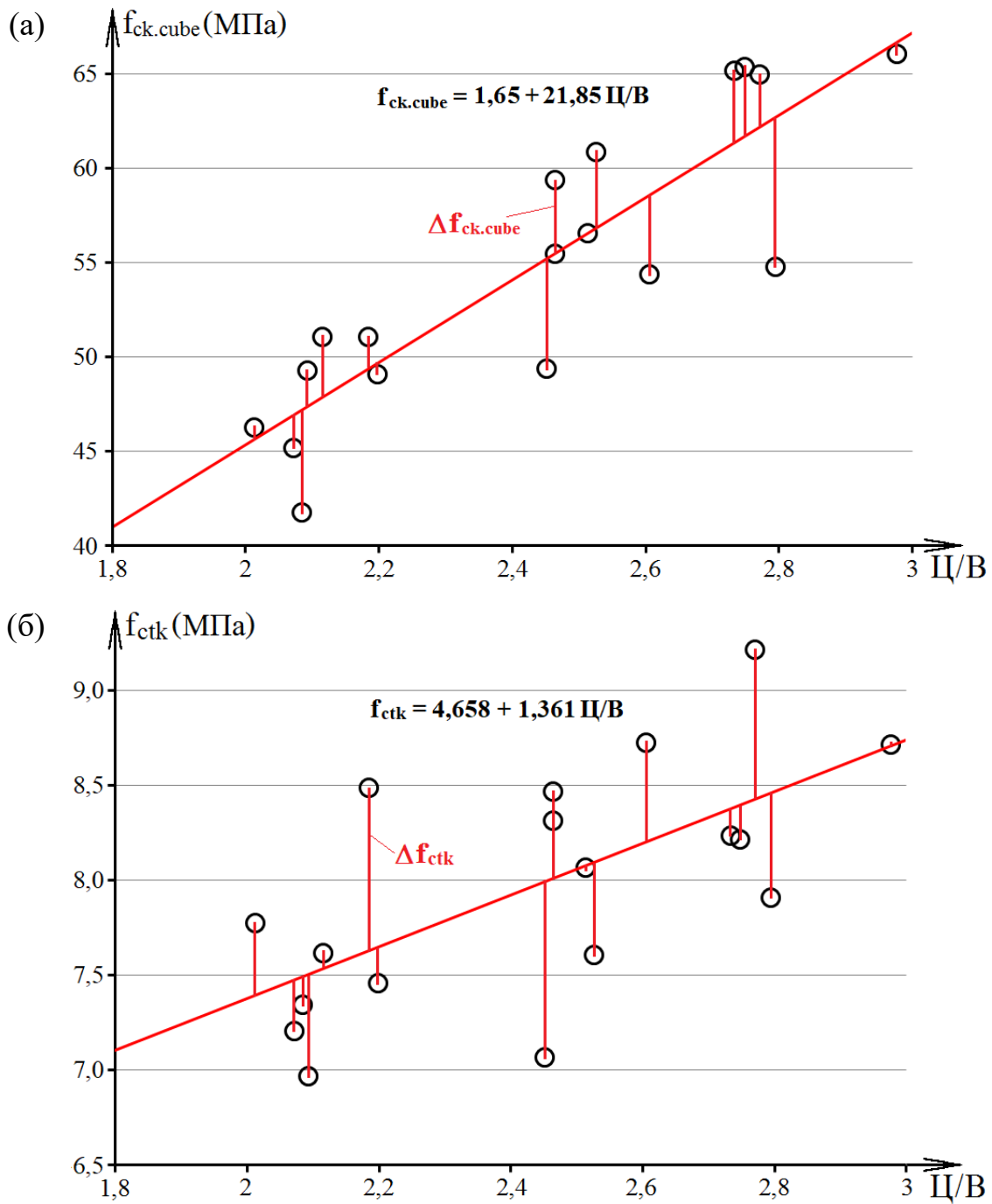


Рис.3.14. Вплив Ц/В на міцність на стиск (а) і міцність на розтяг при згині (б) бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів

Діапазони абсолютних залишків від кореляційних моделей для міцності на стиск і міцності на розтяг при згині наведені в таблиці 3.4. Ці відхилення не залежать від Ц/В суміші, але на них впливає варіація чотирьох факторів складу. Тобто абсолютні відхилення $\Delta\{Y\}$ характеризують вплив фактора на міцність поза його впливу на Ц/В. Цей вплив факторів складу описується власними ЕС-

моделями $\Delta\{Y\}$ ($i=1,\dots,4$) які можна об'єднати з лінійною моделлю $Y\{Ц/В\}$ у вигляді моделі-суми:

$$Y = \{a_0+a_1(Ц/В)\} + \Delta\{Y\}(x_i) \quad (3.10)$$

Таким чином, побудовані у вигляді (3.10) моделі-суми для міцності на стиск і міцності на розтяг при згині бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів відповідно мають вигляд:

$$\begin{aligned} f_{ck.cube} \text{ (МПа)} = \{ & 1,65+21,85Ц/В \} + \{ 3,80+0,61x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,86x_1x_4 \\ & +0,43x_2 \pm 0x_2^2 \quad - 0,97x_2x_3 - 0,51x_2x_4 \\ & +2,74x_3 - 3,57x_3^2 \quad - 0,98x_3x_4 \\ & +1,47x_4 - 1,17x_4^2 \} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} f_{ctk} \text{ (МПа)} = \{ & 4,658+1,361 \times Ц/В \} + \{ 0,298+0,302x_1 - 0,103x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,089x_1x_4 \\ & +0,383x_2 - 0,147x_2^2 \quad + 0,033x_2x_3 - 0,094x_2x_4 \\ & +0,125x_3 - 0,195x_3^2 \quad + 0,034x_3x_4 \\ & - 0,021x_4 + 0,139x_4^2 \} \end{aligned} \quad (3.12)$$

На рис.3.15.а показані суміщені однофакторні діаграми для міцності на стиск (за ЕС-моделлю 3.4) і абсолютних залишків від кореляційної моделі (за ЕС-моделлю 3.11), побудовані таким чином, що криві проходять через екстремальні точки $f_{ck.cube.max}$ і $f_{ck.cube.min}$ та відповідно $\Delta f_{ck.cube.max}$ і $\Delta f_{ck.cube.min}$. Рівні максимумів і мінімумів двох ЕС-моделей при побудові діаграм суміщені. На рис.3.15.б показані аналогічні суміщені однофакторні діаграми для міцності на розтяг при згині (за ЕС-моделлю 3.8) та абсолютних залишків від кореляційної моделі (за ЕС-моделлю 3.12).

Аналіз діаграм дозволяє зробити висновок, що зростання міцності на стиск (рис.3.15.а) і на розтяг при згині (рис.3.15.б) бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів при збільшенні у їх складі кількості портландцементу

обумовлювався переважно зниженням Ц/В сумішей рівної рухомості. Це підтверджується тим, що поліноміальна частина ЕС-моделей (3.11) і (3.12) показує менший рівень впливу фактора X_1 відповідно на $\Delta f_{ck.cube}$ і Δf_{ctk} , ніж рівень впливу цього фактора на натурні величини $f_{ck.cube}$ і f_{ctk} .

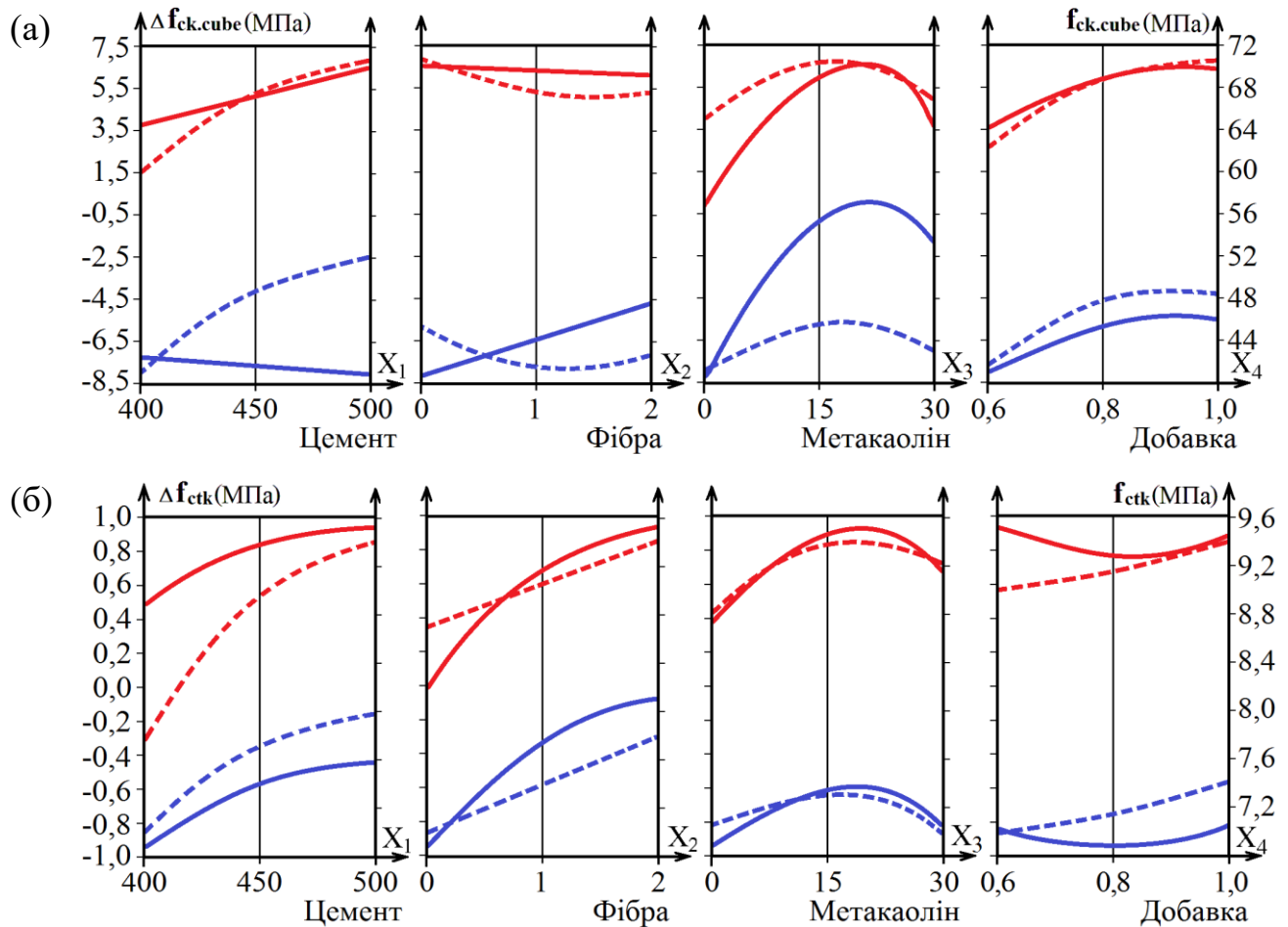


Рис.3.15. Вплив факторів складу на міцність на стиск $f_{ck.cube}$ (а) і на міцність на розтяг при згині f_{ctk} (б) бетонів і фібробетонів (пунктир) та величину абсолютних залишків $\Delta f_{ck.cube}$ (а) і Δf_{ctk} (б) від кореляційних моделей впливу цементно-водного відношення (жирна лінія)

Аналогічно завдяки аналізу діаграм можна зробити висновок, що вплив кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на міцність на стиск (рис.3.15.а) і на розтяг при згині (рис.3.15.б) досліджених бетонів в рамках факторного простору експерименту обумовлений також переважно зміною Ц/В суміші – рівень впливу фактору X_4 на залишки від кореляційних моделей

(жирна лінія) є меншим, ніж вплив даного фактору на величини $f_{ck.cube}$ і f_{ctk} (пунктир).

При цьому завдяки відокремленню впливу факторів на Ц/В позитивний вплив активної мінеральної добавки метакаоліну (X_3) на міцність на стиск і на розтяг при згині (точніше на величини $\Delta f_{ck.cube}$ і Δf_{ctk}) стає більш вираженим. Аналогічно позитивний вплив дисперсного армування поліпропіленовою фіброю на міцність на розтяг при згині також стає більш вираженим. Тобто при зростанні рівня фактора X_2 величина Δf_{ctk} зростає в більшій мірі, ніж f_{ctk} .

Таким чином, завдяки використанню обчислювального експерименту були отримані дані, що недоступні при використанні лише загальноприйнятих методик аналізу результатів планованого експерименту. Аналіз залишків від кореляційної лінійної функції впливу Ц/В дозволив оцінити роль в структуроутворенні факторів складу бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів поза їх зв'язком з водопотребою сумішей рівної рухомості.

Висновки за 3-м розділом

1. Із застосуванням методів планування експерименту і експериментально-статистичного моделювання досліджені фізико-механічні властивості модифікованих бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Встановлено, що В/Ц бетонних сумішей рівної рухомості залежало від складу бетону і варіювалося від 0,332 до 0,515. Введення поліпропіленової фібри і метакаоліну викликає необхідність підвищення В/Ц для збереження рухомості суміші. Підвищення кількості добавки Coral ExpertSuid-5 з 0,6 до 0,9..1% відчутно знижує В/Ц суміші.

2. При підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 до 0,9-1% міцність бетонів і фібробетонів на стиск зростає на 7-9 МПа, при цьому позитивний вплив добавки проявляється вже у віці 3-х і 7-ми діб. За рахунок введення метакаоліну у кількості 15-20 кг/м³ міцність бетонів на стиск в

залежності від кількості портландцементу і віку підвищується на 5-7 МПа. При використанні раціональної кількості добавки Coral ExpertSuid-5 (0,8..0,9% від маси цементу) і метакаоліну ($15..20 \text{ кг/м}^3$) міцність бетонів на стиск підвищується на 15-16 МПа, при цьому вже у віці 3-х діб міцність модифікованих бетонів на 11-12 МПа більше міцності бетонів з мінімальною кількістю добавки Coral ExpertSuid-5.

4. За рахунок дисперсного армування міцність бетонів дорожніх покриттів на розтяг при згині підвищується на 0,5..0,9 МПа. При використанні комплексної модифікації та дисперсного армування міцність на розтяг при згині бетонів дорожніх покриттів підвищується на 0,9..1,0 МПа у віці 3-х діб, на 1,0..1,3 МПа у віці 7-ми діб, на 1,2..1,4 МПа у віці 28-ми діб і на 1,3..1,6 МПа у віці 180-ти діб. Міцність модифікованих бетонів на розтяг при згині у віці 3-х діб складає 75..80% від міцності даних бетонів у 28-ми денному віці.

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

6. Оцінена роль в структуроутворенні бетонів і фібробетонів варійованих факторів складу поза їх зв'язком з водопотребою сумішей рівної рухомості завдяки аналізу залишків від кореляційної лінійної функції впливу Ц/В на міцність.

7. Результати досліджень, які викладені у даному розділі, опубліковані у роботах [157-161].

РОЗДІЛ 4

ДОВГОВІЧНІСТЬ І СТРУКТУРА

МОДИФІКОВАНИХ БЕТОНІВ І ФІБРОБЕТОНІВ

На дорожні покриття одночасно і нерівномірно впливають декілька експлуатаційних і кліматичних факторів. Це зміна температури в великих межах, циклічне заморожування та відтавання, зволоження та висушування, вплив солей, навантаження і динамічний вплив від транспорту (рис.4.1). Кількість циклів заморожування і відтаювання покриттів може бути значно більшою за кількість переходів температури повітря через 0°C . В матеріалі жорсткого дорожнього одягу також існують значні градієнти вологості та температури по висоті конструкції. В таких умовах основними показниками якості, що забезпечують довговічність бетонів жорстких дорожніх покриттів є морозостійкість, зносостійкість, водонепроникність і тріщиностійкість. При цьому морозостійкість характеризує стійкість бетонів не лише в умовах заморожування і відтаювання, а і в умовах циклічної зміни температури в позитивному діапазоні, що характерно для літніх місяців.

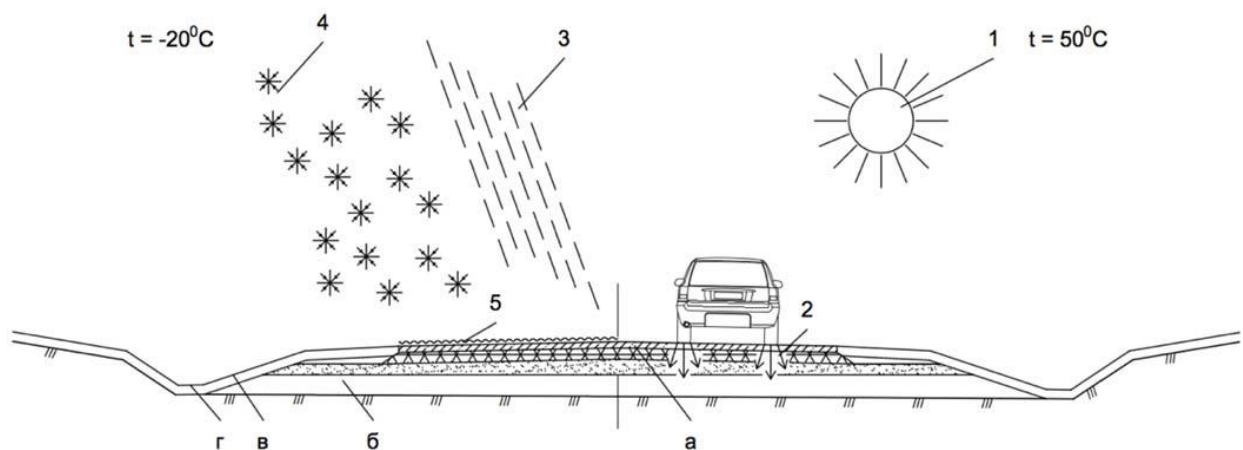


Рис.4.1. Вплив експлуатаційних факторів на дорожні покриття
а – дорожнє покриття; б – земляне полотно; в – відкоси; г – кювети; 1 – вплив температура $-20..+50^{\circ}\text{C}$; 2 – навантаження від автотранспорту; 3 – дощ; 4 – сніг; 5 – сольові інгредієнти

4.1 Вплив складу бетонів і фібробетонів на їх морозостійкість

Значення морозостійкості, стиранності та водонепроникності досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у 18 експериментальних точках наведені у таблиці 4.1.

Відомо, що особливості капілярно-порової структури бетону в найбільшій мірі обумовлюють його стійкість до дії заморожування і відтаювання. Лід має більший об'єм у порівнянні з водою, з якої він утворився, відповідно раніше вважалося що саме крига, яка кристалізується, утворює місцеві напруження в порах бетону. Проте сьогодні встановлено, що одною з основних причин морозного руйнування бетону є гідравлічний тиск, що виникає при замерзанні води у порах вологого композиту [162]. При цьому Т. Пауерс вважав, що ця вода віджимається із зони замерзання [163]. Сучасна наука різні коефіцієнти температурного розширення складових, осмос і прояви капілярних ефектів також відносить до причин руйнування бетону при заморожуванні і відтаюванні [164]. В.М. Вировий [59, 142] обґрунтував, що руйнування бетону як грубогетерогенного композиційного матеріалу під дією заморожування і відтаювання відбувається насамперед завдяки розвитку технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу. В частково або повністю заповнених водою технологічних тріщинах і поверхнях при її замерзанні виникають напруження, що здатні викликати геометричні зміни форми даних тріщин та поверхонь. Це в свою чергу викликає поступове просування фронту тріщини в бетоні, також можуть з'являтися нові експлуатаційні тріщини на берегах початкових тріщин на границі розділу «вода – лід». При виході фронту тріщини на існуючу внутрішню поверхню розділу в бетоні ця тріщина також перетворюється на внутрішню поверхню розділу. Сума цих процесів викликає поступову деструкцію композиційного матеріалу.

За наведеними у таблиці 4.1 даними була побудована ЕС-модель, яка відображає вплив варіюваних факторів складу на морозостійкість бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів:

$$\begin{aligned}
 F (\text{цикли}) = & 393 + 60x_1 \pm 0x_1^2 + 8x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \\
 & + 23x_2 - 14x_2^2 - 10x_2x_3 \pm 0x_2x_4 \\
 & + 7x_3 - 29x_3^2 + 7x_3x_4 \\
 & + 19x_4 - 23x_4^2
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Таблиця 4.1

Морозостійкість, стираність і водонепроникність бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів

№	Морозостійкість (цикли)	Стираність (г/см ²)	Водонепроникність W (атм)
1	400	0,35	12
2	250	0,53	8
3	300	0,41	6
4	350	0,47	12
5	450	0,29	14
6	400	0,36	10
7	300	0,36	8
8	300	0,50	8
9	350	0,45	12
10	400	0,39	12
11	250	0,45	6
12	300	0,41	8
13	350	0,46	12
14	300	0,44	6
15	300	0,49	8
16	400	0,43	12
17	300	0,42	6
18	250	0,48	8

Слід зауважити, що точність даної ЕС-моделі обмежена завдяки специфіці визначення показника морозостійкості, який може змінюватися лише дискретно з кроком 50 циклів (F300, F350 і так далі). Проте це впливає на загальний характер впливу варійованих факторів на показник F, що дозволяє використовувати ЕС-модель для аналізу.

Поле властивостей ЕС-моделі (4.1) показує мінімальне значення $F_{\min} = 222$ цикли у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = -1$, тобто для складу бетонів з мінімальною кількістю цементу і добавки Coral ExpertSuid-5, без метаксаоліну та поліпропіленової фібри. Максимальне значення морозостійкості $F_{\max} = 474$ цикли відповідає складу фібробетону у точці з координатами $x_1 = x_2 = 1$, $x_3 = 0,1$, $x_4 = 0,41$ тобто при максимальній кількості портландцементу і фібри, при кількості метаксаоліну $16..17 \text{ кг/м}^3$, та добавки комплексної дії приблизно 0,9% від маси цементу.

За ЕС-моделлю (4.1) побудовані показані на рис.4.2 однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів на морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів.

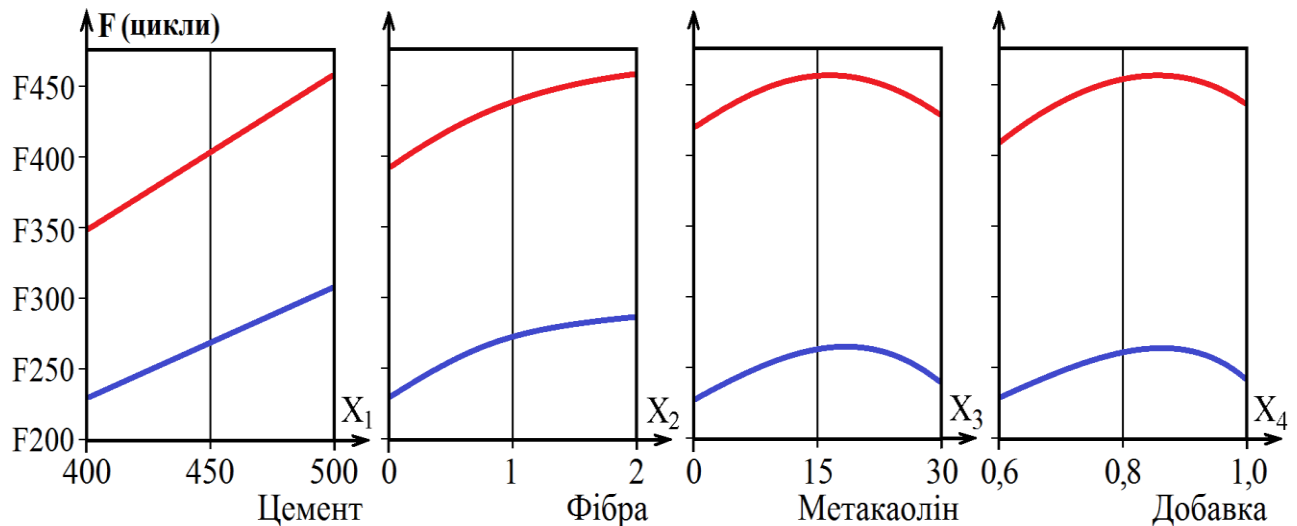


Рис.4.2. Вплив варійованих факторів складу на морозостійкість бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів

Аналіз діаграм на рис.4.2 показує, що на рівень морозостійкості бетонів жорстких дорожніх покриттів суттєво впливає кількість портландцементу,

поліпропіленової фібри і добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5. Вплив кількості метакаоліну на рівень F є дещо меншим порівняно з дією інших варійованих факторів, при цьому найбільшою морозостійкістю характеризуються бетони з кількістю метакаоліну близько 16..17 кг/м³.

Для більш детального аналізу впливу варійованих факторів складу на морозостійкість досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів за ЕС-моделлю (4.1) побудована діаграма типу «квадрати на квадраті», показана на рис.4.3. Діаграма за типом аналогічна діаграмам, показаних на рис.3.9, рис.3.11 і рис.3.13, при її побудові у якості несучого квадрату обрано квадрат в координатах «кількість метакаоліну – кількість добавки Coral ExpertSuid-5».

Аналіз діаграми показує, що бетони з кількістю портландцементу 500 кг/м³ мають морозостійкість приблизно на 100 циклів вище, ніж бетони з кількістю в'язучого 400 кг/м³. При введенні фібри у кількості 1,5-2 кг/м³ морозостійкість бетонів жорстких дорожніх покриттів зростає на 50 циклів і більше. При підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 з 0,6% до 0,8-0,9% від маси цементу рівень F зростає на величину до 50 циклів, при цьому більш відчутно для бетонів з мета каоліном у складі. Сумарно за рахунок використання раціональної кількості модифікаторів (0,8-1% добавки Coral ExpertSuid-5 і 15-18 кг/м³ метакаоліну) морозостійкість бетонів і фібробетонів зростає на 50-100 циклів в залежності від рівня інших факторів складу.

Важливо відзначити, що у таблиці 4.1, відповідно ЕС-моделі (4.1) та у наведеному вище в даному підрозділі аналізі морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів наводилася в значеннях, визначених згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 як для конструктивних бетонів («Всі види бетонів»), а не як для «Бетонів дорожніх і аеродромних покриттів». Це пов'язано з більшою точністю визначення показника F по прискореній методиці само за цим методом. При переводі отриманих значень морозостійкості в морозостійкість «Бетонів дорожніх і аеродромних покриттів» можна прийняти, що для F250 і F300 («Всі види бетонів») морозостійкість складає F100, для F350, F400 і F450 («Всі види бетонів») морозостійкість складає F150.

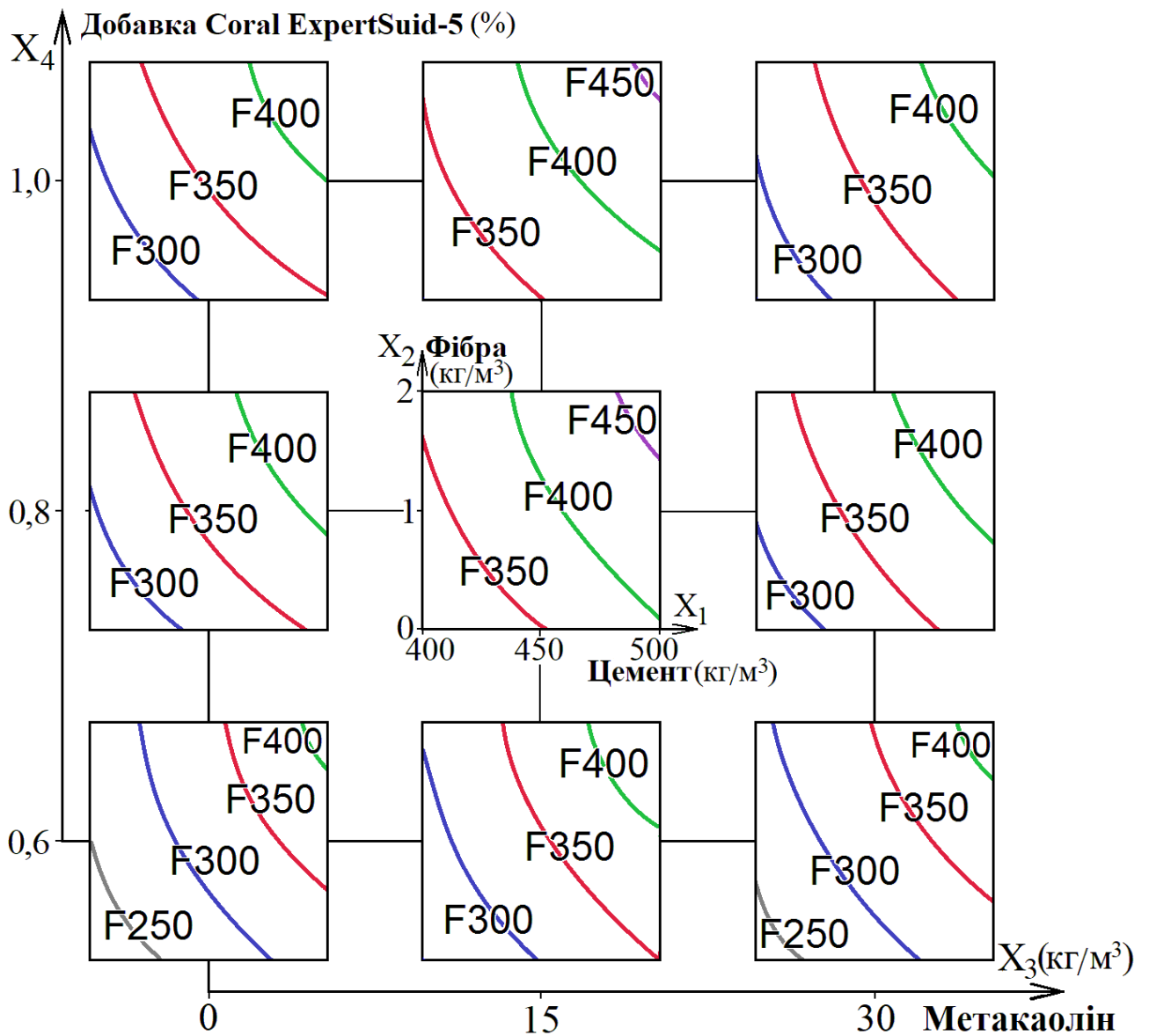


Рис.4.3. Вплив варійованих факторів складу на морозостійкість бетонів і фібробетонів

Тобто для бетонів з раціональною кількістю добавки Coral ExpertSuid-5 (0,8-0,9%), метакаоліну (15..18 кг/м³) і фібри (1,2-2,0 кг/м³) навіть при кількості в'язучого, близькій до мінімальній, морозостійкість як для «Бетонів дорожніх і аеродромних покриттів» складає F150.

В цілому розроблені модифіковані фібробетони жорстких дорожніх покриттів в залежності від кількості портландцементу у складі мають морозостійкість від F350 до F450 («Всі види бетонів» згідно ДСТУ Б В.2.7-49-

96), що забезпечує їх достатню довговічність в умовах багаторазового заморожування і відтаювання.

4.2 Зносостійкість і водонепроникність бетонів жорстких дорожніх покриттів

Як зазначалося вище, зносостійкість бетону є важливою характеристикою, яка в значній мірі обумовлює довговічність жорстких дорожніх покриттів. Наприклад [165] показано, що збільшення стиранності бетону до 0,75 г/см² призводить до повної втрати його здатності протистояти комплексному морозо-сольовому впливу, тому рівень G для дорожніх покриттів рекомендовано обмежувати 0,50 г/см². За даними, що наведені у таблиці 4.1, була побудована ЕС-модель, яка відображає вплив варійованих факторів складу на стиранність (зносостійкість) бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів:

$$\begin{aligned}
 G \text{ (г/см}^2\text{)} = & 0,350 - 0,036x_1 \pm 0,020x_1^2 - 0,016x_1x_2 - 0,008x_1x_3 \pm 0x_1x_4 \\
 & - 0,056x_2 + 0,030x_2^2 \qquad \qquad \qquad \pm 0x_2x_3 \qquad \qquad \pm 0x_2x_4 \\
 & - 0,006x_3 + 0,012x_3^2 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \pm 0x_3x_4 \\
 & - 0,018x_4 + 0,022x_4^2 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad (4.2)
 \end{aligned}$$

Для ЕС-моделі (4.2) поле властивостей показує мінімальне значення, відповідно найнижчу стиранність (найкращу зносостійкість) $G_{\min} = 0,285$ г/см² у точці з координатами $x_1 = x_2 = 1$, $x_3 = 0,41$, $x_4 = 0,58$, тобто при максимальній кількості портландцементу і фібри, кількості метакаоліну приблизно 20 кг/м³ і добавки Coral ExpertSuid-5 приблизно 0,9%. Максимальну стиранність $G_{\max} = 0,530$ г/см² мають бетони у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = -1$, тобто при мінімальній кількості портландцементу, добавки Coral ExpertSuid-5, без поліпропіленової фібри та метакаоліну.

На рис.4.4 показані побудовані за ЕС-моделлю (4.2) однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів складу на стиранність досліджених бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів.

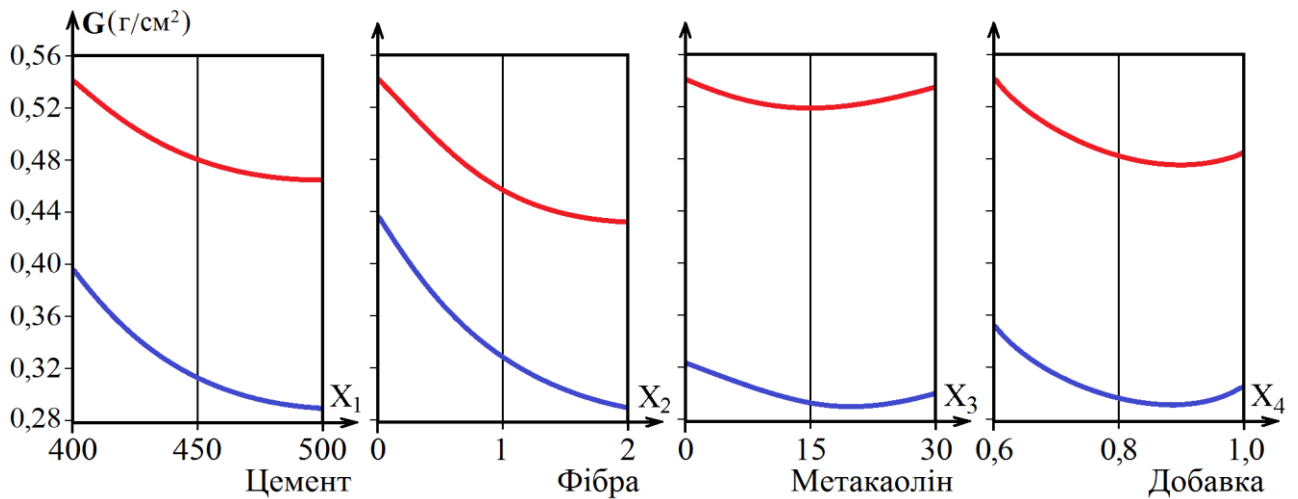


Рис.4.4. Вплив варійованих факторів складу на стиранність бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів

Як видно з наведених на рис.4.4 діаграм, найбільш суттєво на стиранність досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів впливає кількість фібри і портландцементу, а найменше – кількість метакаоліну. При цьому бетони з кількістю даної активної мінеральної добавки 18-20 кг/м³ характеризуються дещо нижчою стиранністю, ніж бетони без метакаоліну. Відповідно для більш детального аналізу впливу кількості портландцементу, метакаоліну і поліпропіленової фібри на стиранність досліджених бетонів і фібробетонів була побудована показана на рис.4.5 діаграма. При побудові даної діаграми рівень фактору x_3 фіксувався на середньому значенні, що відповідає близької до раціональної кількості метакаоліну 15 кг/м³.

Аналіз наведеної на рис.4.5 діаграми показує, що дисперсне армування є ефективним методом зниження стиранності бетонів жорстких дорожніх покриттів, тобто дозволяє суттєво підвищити їх зносостійкість. За рахунок введення поліпропіленової фібри у кількості 1,5-2 кг/м³ стиранність бетону знижувалася на 0,11-0,16 г/см², що в залежності від складу дорівнює від 22 до

35%. Також достатньо відчутно на стиранисть досліджених бетонів жорстких дорожніх покриттів впливає кількість портландцементу. При підвищенні кількості в'язучого у складі з 400 до 500 $\text{кг}/\text{м}^3$ величина G знижується на 0,07-0,10 $\text{г}/\text{см}^2$. Це пояснюється зростанням міцності бетону при підвищенні кількості портландцементу, що природно впливає на стиранисть матеріалу і що співпадає з даними багатьох дослідників, зокрема [27]. Аналогічним ефектом можна пояснити позитивний вплив добавки Coral ExpertSuid-5 на зносостійкість бетону. За рахунок підвищення кількості добавки комплексної дії (яка діє як суперпластифікатор) з 0,6 до 0,9% знижується В/Ц суміші, відповідно підвищується міцність бетону, що знижує величину його стиранисті. Комплексне застосування фібри і раціональної кількості суперпластифікатору дозволяє знизити стиранисть бетону на 40-45%.

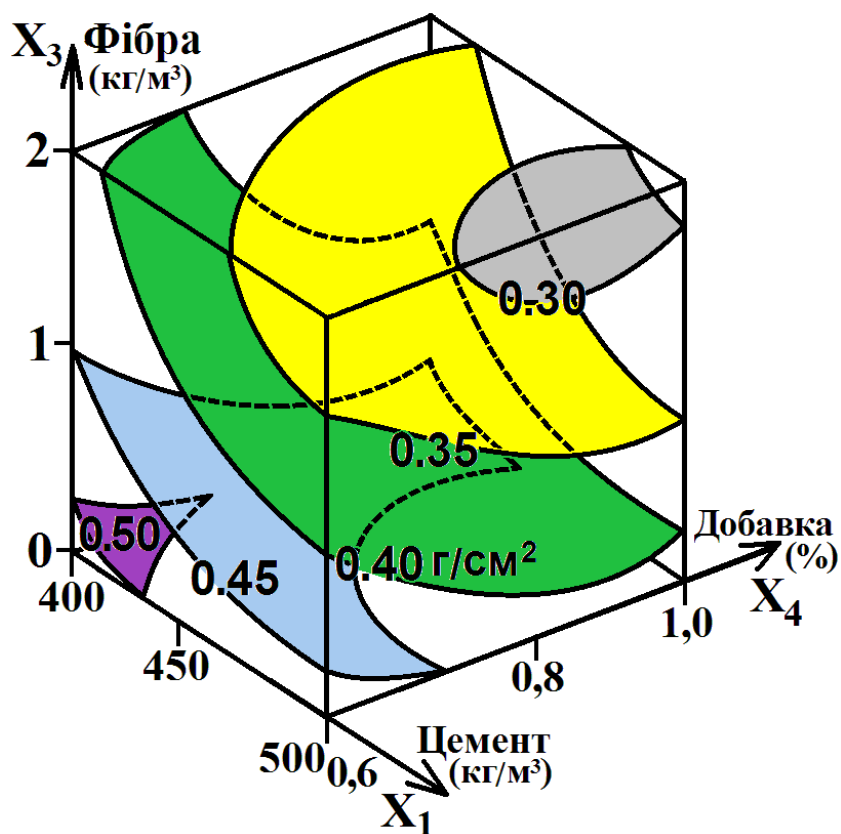


Рис.4.5. Вплив кількості портландцементу, поліпропіленової фібри і добавки Coral ExpertSuid-5 на стиранисть бетонів і фібробетонів ($x_3=0$)

В цілому розроблені бетони при використанні раціональної кількості поліпропіленової фібри і добавки Coral ExpertSuid-5 мають виску зносостійкість, що є важливим з позиції забезпечення довговічності жорстких дорожніх покриттів.

Як зазначено вище, дорожні покриття під час експлуатації піддаються впливам агресивних речовин різного типу, зокрема сольових інгредієнтів. Це може викликати корозію бетону, одним з основних методів протидії якої є зниження проникності матеріалу. Показником якості, що визначає проникність бетону для розчинів агресивних речовин, є водонепроникність.

ЕС-модель, що описує вплив варійованих факторів складу на водонепроникність досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W \text{ (атм)} = & 11,9 + 2,7x_1 - 0,4x_1^2 + 0,6x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,5x_1x_4 \\
 & - 0,3x_2 - 0,7x_2^2 \qquad \qquad -0,2x_2x_3 + 0,3x_2x_4 \\
 & + 0,5x_3 - 1,1x_3^2 \qquad \qquad \qquad \pm 0x_3x_4 \\
 & + 0,9x_4 - 0,5x_4^2 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad (4.3)
 \end{aligned}$$

Поле властивостей даної ЕС-моделі показує мінімальне значення $W_{\min} = 4,9$ атм у точці з координатами $x_1 = x_3 = x_4 = -1$, $x_2 = 1$, що відповідає складу з мінімальною кількістю портландцементу і добавки Coral ExpertSuid-5, без метакаоліну та з максимальною кількістю фібри. Максимальне значення водонепроникності $W_{\max} = 15,3$ атм спостерігається у точці з координатами $x_1 = x_4 = 1$, $x_2 = -0,32$, $x_3 = 0,17$, що відповідає складу з максимальною кількістю портландцементу і добавки Coral ExpertSuid-5, кількістю фібри, близькою до мінімальної, та кількістю метакаоліну близько 17 кг/м^3 .

За ЕС-моделлю (4.3) побудовані однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів складу на водонепроникність бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів, які показані на рис.4.6.

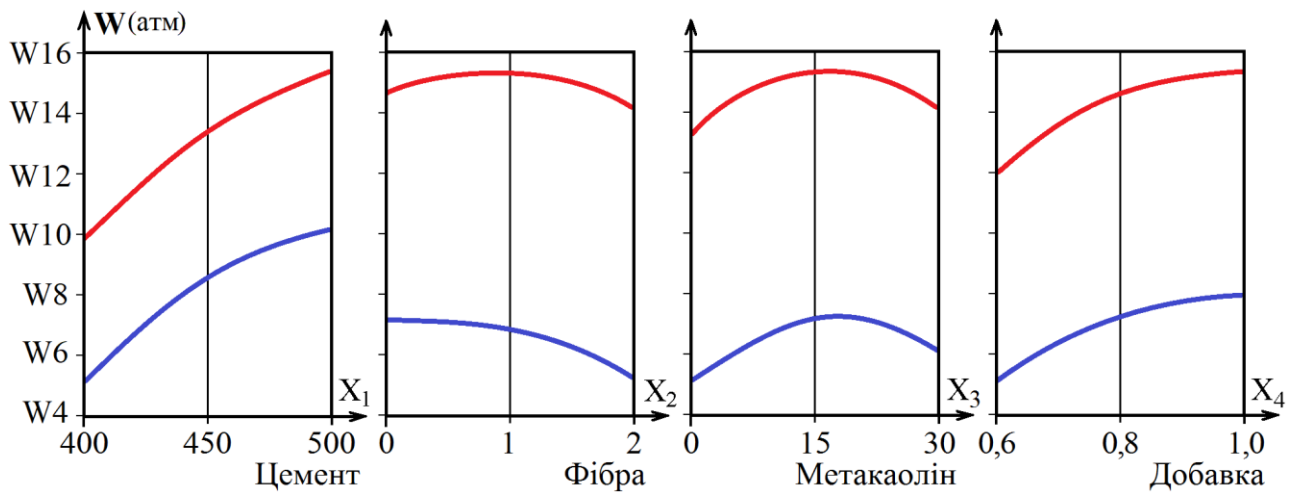


Рис.4.6. Вплив варійованих факторів складу на водонепроникність бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів

Аналіз показаних на рис.4.6 діаграм дозволяє сказати, що найбільш суттєво на водонепроникність досліджених бетонів і фібробетонів впливає кількість портландцементу (x_1) і добавки Coral ExpertSuid-5 (x_4). При цьому найменший вплив на рівень W надає кількість поліпропіленової фібри (x_3). При застосуванні максимальної кількості фібри ($1,5-2 \text{ кг/м}^3$) водонепроникність бетонів з меншою кількістю портландцементу, тобто в зоні мінімумів, дещо знижується, що пояснюється впливом дисперсної арматури на В/Ц суміші. Але величина цього зниження фактично знаходиться у межах точності методу визначення W , тобто до 2 атм.

Відповідно для більш детального аналізу впливу кількості цементу, метаксаоліну і добавки Coral ExpertSuid-5 на водонепроникність фібробетонів жорстких дорожніх покриттів за ЕС-моделлю (4.3) була побудована показана на рис.4.7 діаграма у вигляді кубу. При побудові діаграми кількість фібри була зафіксована на середньому рівні ($x_2=0$).

Як показує аналіз наведеної на рис.4.7 діаграми, при збільшенні у складі фібробетону кількості портландцементу з 400 до 500 кг/м^3 водонепроникність матеріалу зростає у середньому на 2 марки (4 атм). При підвищенні кількості добавки Coral ExpertSuid-5 з 0,6% до 0,9% за рахунок зниження В/Ц суміші рівень W зростає приблизно на 1 марку. Подальше підвищення кількості

добавки полікарбоксилатного типу, до 1%, практично не впливає на водонепроникність матеріалу. За рахунок введення раціональної кількості метакаоліну (16-18 кг/м³) водонепроникність досліджених бетонів і фібробетонів жорстких покриттів зростає в середньому на 1 марку. Введення більшої кількості добавки пуцоланового типу негативно впливає на рівень W, що пояснюється підвищенням В/Ц суміші.

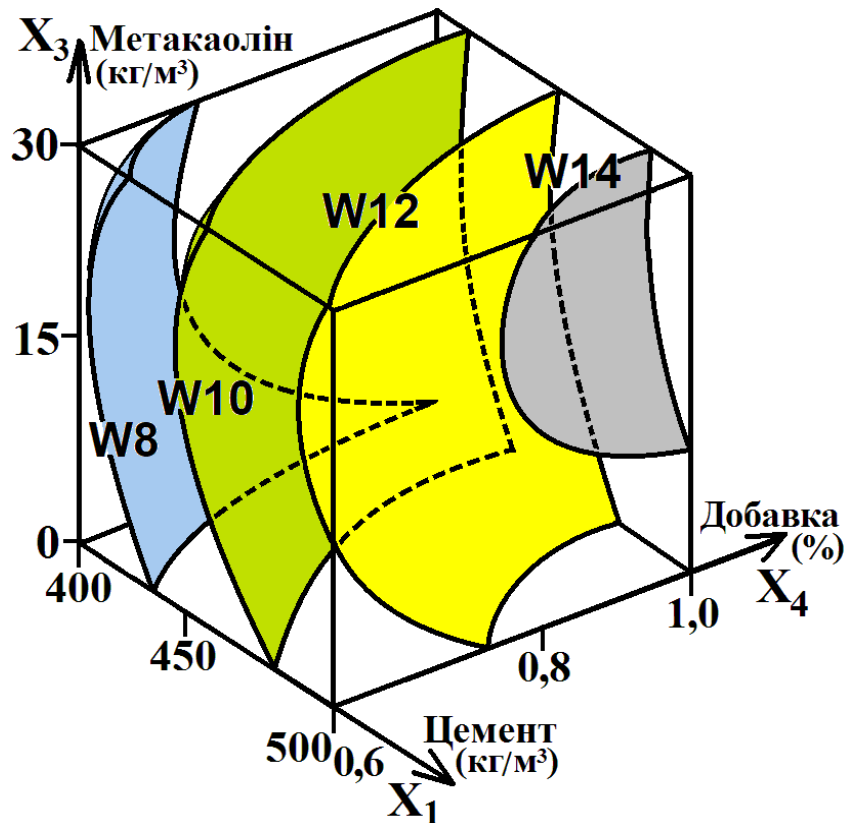


Рис.4.7. Вплив кількості портландцементу, метакаоліну і добавки Coral ExpertSuid-5 на водонепроникність фібробетонів ($x_2=0$)

В цілому досліджені бетони і фібробетони при використанні комплексної модифікації раціональною кількістю добавки полікарбоксилатного типу і метакаоліном мають в залежності від кількості в'язучого водонепроникність від W10 до W14, що забезпечує високу стійкість жорстких дорожніх покриттів до дії агресивних речовин, зокрема сольових інгредієнтів.

4.3 Дослідження водопоглинання та середньої густини бетонів і фібробетонів

Для бетонів жорстких покриттів автомобільних доріг середня густина не регламентується діючим нормативними документами, але її значення є достатньо показовим інтегральним показником, що характеризує структуру матеріалу.

Середня густина досліджених бетонів і фібробетонів визначалася в сухому стані (після висушування зразків до постійної маси при температурі $105\pm 5^{\circ}\text{C}$), при рівноважній вологості (у повітряно-сухих умовах), а також у водонасиченому стані (після експонування зразків у воді до постійної маси). Отримані дані наведено у таблиці 4.2.

Також визначення середньої густини у різних станах дозволило розрахувати водопоглинання бетонів і фібробетонів у контрольних точках (таблиця 4.2), що також є величиною відкритої пористості бетонів.

За даними про середню густина бетонів, наведеними у таблиці 4.2, були побудовані відповідні ЕС-моделі. Коефіцієнти розрахованих ЕС-моделей наведені у таблиці 4.3.

Однофакторні діаграми, побудовані за відповідними ЕС-моделями (таблиця 4.3), що відображають вплив варійованих факторів складу на середню густина досліджених бетонів в сухому стані, при рівноважній вологості та у водонасиченому стані в зонах екстремумів, побудовані за відповідними ЕС-моделями, показані на рис.4.8.

Аналіз діаграм дозволяє сказати, що при підвищенні у складі бетонів кількості портландцементу з 400 до 500 кг/м^3 їх середня густина знижується на $15..25\text{ кг/м}^3$. Це пояснюється тим, що виходячи з принципу підбору складу бетону при цьому знижується кількість щебеню (підвищується його розсунення), а також відповідно зростає кількість «розчинної» складової, яка має меншу середню густина. При використанні поліпропіленової фібри середня

густина бетону також знижується на 25..35 кг/м³, що пояснюється зростанням В/Ц суміші.

Таблиця 4.2

Середня густина і водопоглинання бетонів і фібробетонів
жорстких дорожніх покриттів

№	Середня густина (кг/м ³)			Водопоглинання (%)
	в сухому стані	при рівноважній вологості	у водонасиченому стані	
1	2306	2354	2412	4,59
2	2314	2379	2427	4,89
3	2329	2383	2434	4,51
4	2337	2385	2421	3,59
5	2331	2383	2432	4,34
6	2307	2367	2425	5,10
7	2301	2365	2423	5,31
8	2374	2422	2478	4,37
9	2365	2421	2467	4,30
10	2315	2387	2446	5,65
11	2299	2353	2410	4,81
12	2334	2396	2447	4,83
13	2337	2401	2448	4,73
14	2297	2365	2422	5,46
15	2376	2430	2470	3,94
16	2352	2412	2461	4,64
17	2305	2370	2433	5,54
18	2369	2421	2469	4,22

Коефіцієнти ЕС-моделей, що описують вплив факторів складу на середню
густину бетонів і фібробетонів

Коефіцієнти ЕС-моделей		b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{44}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{23}	b_{24}	b_{34}
Середня густина (кг/м ³)	у сухому стані ρ_c	2307,7	-2,9	-20,7	0	8,9	-4,9	24,5	5,1	0	0	8,5	-11,8	6,3	0	8,4
	при рівноважній вологості ρ_n	2359,7	-3,8	-19,4	5,1	4,8	0	25,2	0	6,0	0	8,3	-13,6	5,9	0	7,1
	у водоносиченому стані ρ_w	2412,7	-4,9	-15,2	5,7	0	0	21,9	7,1	0	0	8,2	-15,3	6,1	0	8,5

Введення метакаоліну найменш впливає на середню густину досліджених бетонів і фібробетонів в порівнянні з іншими факторами складу. При використанні даної добавки у кількості 20-30 кг/м³ середня густина бетону знижується на 10..15 кг/м³, що пояснюється підвищенням В/Ц суміші. Найбільш суттєво на середню густину впливає кількість добавки Coral ExpertSuid-5. При підвищенні кількості даного модифікатора з 0,6% до 0,9-1% середня густина бетонів і фібробетонів зростає на 35..50 кг/м³, що є наслідком зниження водопотреби суміші та відповідного ущільнення затверділого матеріалу.

В цілому середня густина досліджених бетонів знаходиться в межах, що є середніми для бетонів з такою кількістю в'язучого і такою рухомістю суміші.

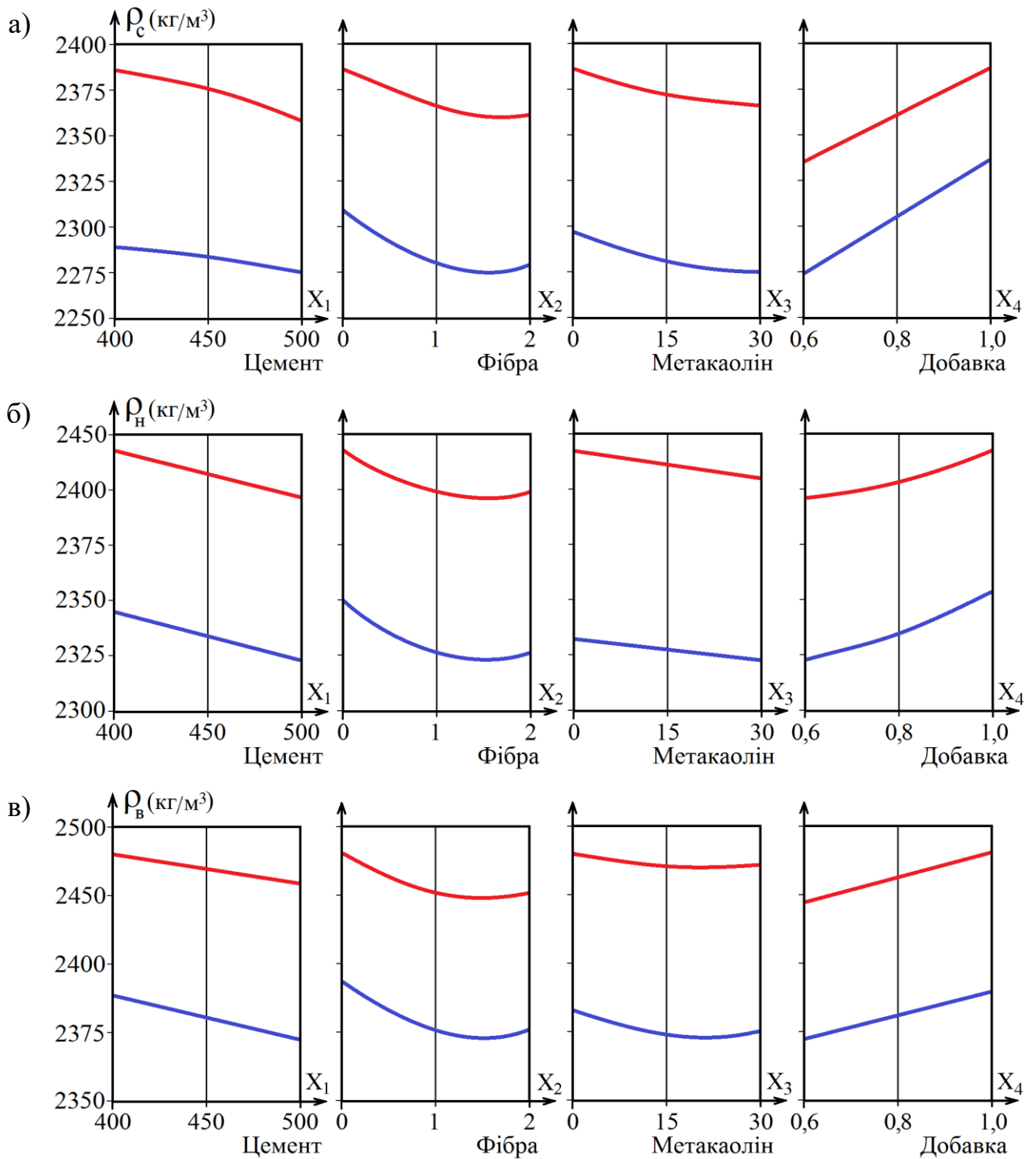


Рис.4.8. Вплив варійованих факторів складу на середню густину бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів в сухому стані (а), при рівноважній вологості (б) та у водонасиченому стані (в)

Як зазначалося вище, також визначалося водопоглинання бетонів і фібробетонів, яке фактично є величиною їх відкритої пористості. ЕС-модель,

що описує вплив варійованих факторів складу на водопоглинання досліджених матеріалів має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W(\%) = & 4,53 - 0,11x_1 + 0,15x_1^2 - 0,12x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 0,14x_1x_4 \\
 & + 0,26x_2 - 0,14x_2^2 \qquad \qquad \qquad \pm 0x_2x_3 - 0,06x_2x_4 \\
 & + 0,27x_3 + 0,13x_3^2 \qquad \qquad \qquad \pm 0x_3x_4 \\
 & - 0,43x_4 \pm 0x_4^2 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad (4.4)
 \end{aligned}$$

Поле властивостей ЕС-моделі (4.4) має мінімальне значення $W_{\min} = 3,58\%$ у точці з координатами $x_1 = 0,43$, $x_2 = x_3 = -1$, $x_4 = 1$, тобто при кількості портландцементу 470 кг/м^3 , без поліпропіленової фібри та метакаоліну і при максимальній кількості добавки Coral ExpertSuid-5. Максимальне водопоглинання $W_{\max} = 5,79\%$ спостерігається для складів у точці з координатами $x_1 = x_4 = -1$, $x_2 = x_3 = 1$ тобто при мінімальній кількості портландцементу і добавки Coral ExpertSuid-5 та при максимальній кількості поліпропіленової фібри та метакаоліну.

Аналіз ЕС-моделі (4.4) показує, що кількість портландцементу впливає на величину відкритої пористості досліджених бетонів і фібробетонів в меншій ступені, ніж варіювання інших факторів складу (коефіцієнт b_1 має найменшу величину серед лінійних). При цьому по мірі збільшення кількості в'язучого у складі бетонів їх відкрита пористість в межах факторного простору експерименту знижується на $0,2..0,4\%$. Такий вплив кількості цементу на капілярно-пористу структуру пояснюється тим, що одночасно зі зростанням кількості в'язучого підвищується і кількість води в суміші, а також виходячи з принципу підбору складу бетону дещо знижується кількість крупного заповнювача.

Діаграма, яка побудована за ЕС-моделлю (4.4) та яка відображає вплив кількості поліпропіленової фібри, метакаоліну та полікарюоксилатної добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 на величину водопоглинання (відкритої пористості) досліджених бетонів і фібробетонів наведена на рис.4.9.

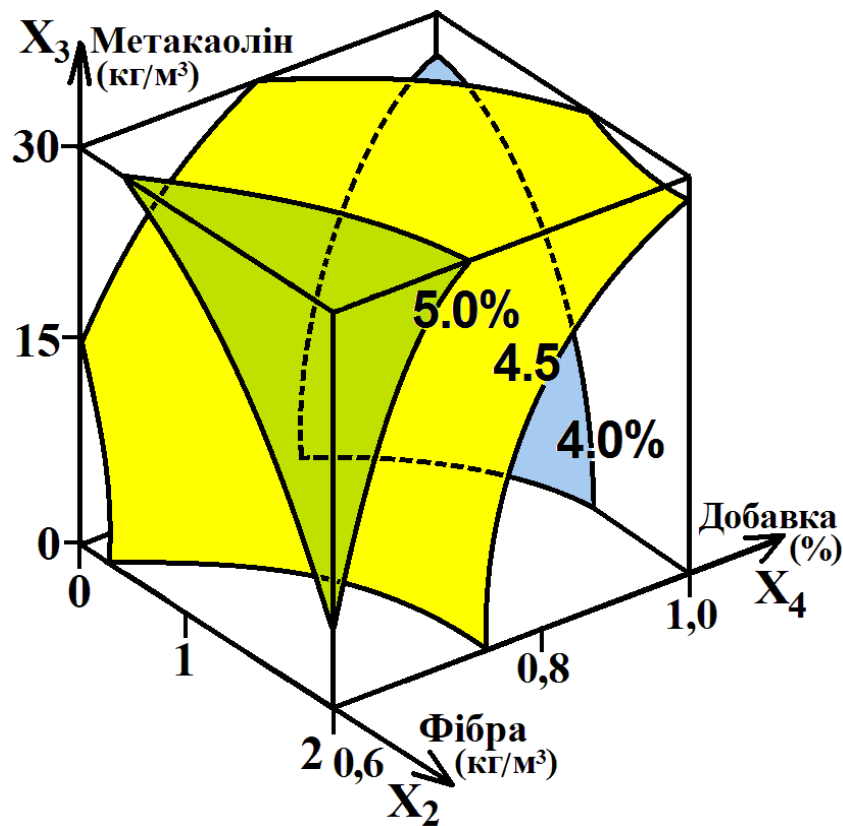


Рис.4.9. Вплив кількості фібри, метакаоліну і добавки Coral ExpertSuid-5 на водопоглинання (відкриту пористість) фібробетонів ($x_1=0$)

Аналіз наведеної на рис.4.9 діаграми показує, що найбільш суттєво на величину відкритої пористості досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів впливає кількість полікарбосилатної добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5. За рахунок зниження В/Ц суміші при підвищенні кількості добавки з 0,6% до 0,9..1% пористість бетону знижується на 0,8..0,9%. При застосуванні 1,5..2 kg/m^3 поліпропіленової фібри відкрита пористість бетонів підвищується в середньому на 0,4%, що пояснюється зростанням В/Ц сумішей рівної рухомості, а також формуванням капілярних пор вздовж волокон дисперсної арматури. Введення метакаоліну у кількості до 10..15 kg/m^3 несуттєво позначається на величині відкритої пористості бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. При підвищенні кількості даної активної мінеральної добавки до 25..30 kg/m^3 відкрита пористість бетонів підвищується на 0,3..0,4%, що викликано зростанням В/Ц суміші.

В цілому за рахунок використання раціональної кількості полікарбоксилатної добавки Coral ExpertSuid-5 (0,8.0,9%) і метакаоліну ($15..20 \text{ кг/м}^3$) незалежно від кількості в'язучого і дисперсної арматури відкрита пористість досліджених бетонів жорстоких дорожніх покриттів знаходиться в межах 4..4,5%, що забезпечує достатню довговічність матеріалу і що показано вище.

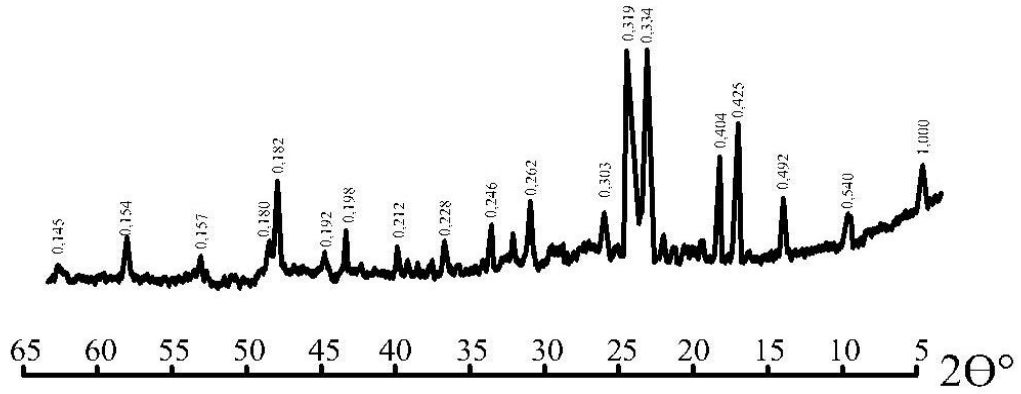
4.4 Рентгенофазовий аналіз структури бетонів

Було проведено рентгенофазовий аналіз структури досліджених бетонів і фібробетонів, зокрема зразків з контрольних точок №1 (характеризується середньою кількістю метакаоліну, добавки Coral ExpertSuid-5 і фібри), №6 (характеризується відсутністю метакаоліну, малою кількістю добавки Coral ExpertSuid-5 і максимальною кількістю фібри), №8 (характеризується відсутністю метакаоліну і фібри, а також малою кількістю добавки Coral ExpertSuid-5) та №9 (характеризується максимальною кількістю метакаоліну і добавки Coral ExpertSuid-5, а також відсутністю фібри).

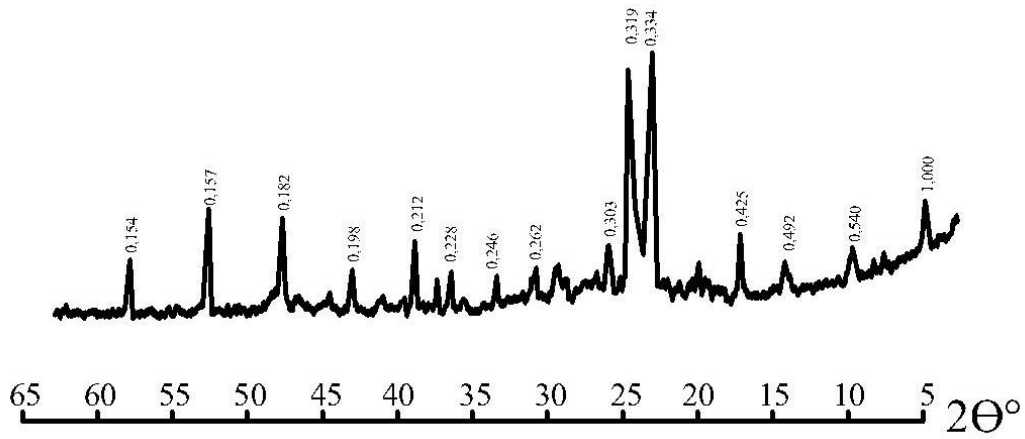
Згідно з результатами рентгенофазового аналізу на дифрактограмах каменю цементно-піщаної матриці зразків з точок №1, №6, №8 і №9 фіксуються характеристичні лінії β -кварцу ($d/n=0,425; 0,334; 0,245; 0,228; 0,212; 0,181; 0,154 \text{ нм}$), польових шпатів типу ортоклазу та анортиту ($d/n=0,644; 0,59; 0,421; 0,402; 0,333; 0,322; 0,318 \text{ нм}$), а також гідрослюди ($d/n=0,998; 0,492; 0,331 \text{ нм}$), що є породоутворювальними мінералами дрібного заповнювача, тобто піску (рис.4.10).

Низька інтенсивність рефлексів негідратованих мінералів портландцементного клінкеру – алітової та белітової фаз ($d/n = 0,302; 0,274; 0,276; 0,218 \text{ нм}$) свідчить про повноту протікання гідратаційних процесів.

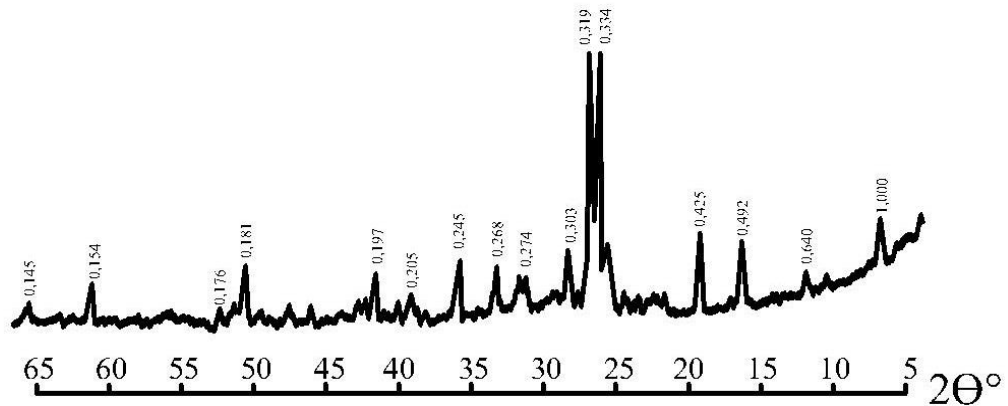
Точка №1



Точка №6



Точка №8



Точка №9

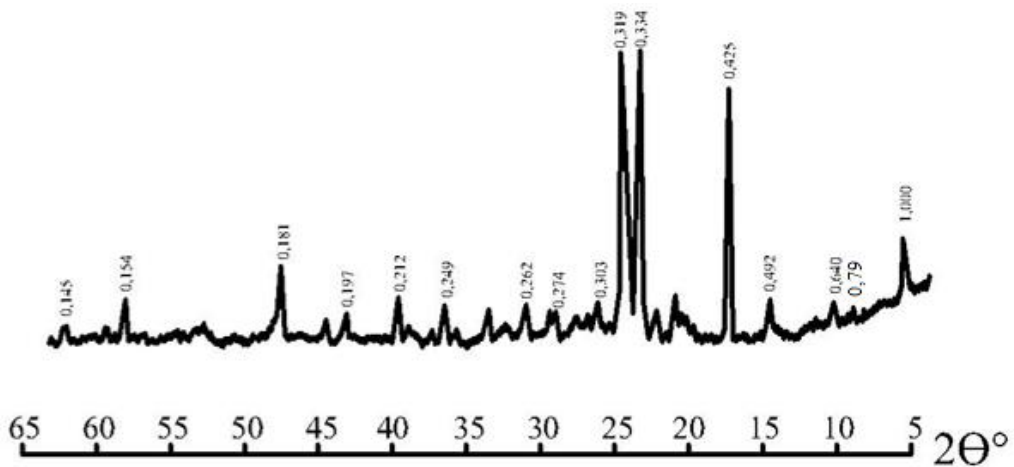


Рис.4.10. Рентгенівські дифрактограми зразків цементно-піщаної матриці досліджених бетонів і фібробетонів

Основними продуктами гідратації портландцементу цементно-піщаної матриці без метаколіну (зразок №8) є еtringіт ($d/n = 0,973; 0,561; 0,256$ нм) і гідроксид кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n = 0,493; 0,263; 0,193; 0,179$ нм).

Як свідчать результати рентгенофазового аналізу, введення фібри до складу цементно-піщаної матриці (зразок №6) не змінює механізму протікання гідратаційних процесів і основні продукти гідратації представлені еtringітом ($d/n = 0,973; 0,561; 0,256$ нм) і гідроксидом кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n = 0,493; 0,263; 0,193; 0,179$ нм). Слід відзначити деяке зниження інтенсивності рефлексів $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

При використанні у складі цементно-піщаної матриці середньої кількості метаколіну, добавки Coral ExpertSuid-5 та фібри (зразок №1) спостерігається незначне зниження інтенсивності характеристичних ліній кальцію гідроксиду в результаті пуцоланових реакцій між активними SiO_2 та Al_2O_3 метаколіну та портландиту з утворенням гідросилікатів та гідроалюмінатів кальцію.

Вплив максимальної кількості добавки метаколіну і добавки Coral ExpertSuid-5 (зразок №9) на фазовий склад цементно-піщаної матриці зумовлений інтенсивнішим і глибшим протіканням пуцоланової реакції, про що свідчить зменшення рефлексів $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в 1,5 рази з утворенням гідросилікатів кальцію та гексагональних гідроалюмінатів кальцію типу C_4AH_{13} ($d/n = 0,79; 0,247$).

Таким чином, проведений рентгенофазовий аналіз структури досліджених бетонів і фібробетонів підтвердив ефективність впливу використаних модифікаторів, зокрема позитивну роль метаколіну як активної пуцолани.

4.5 Аналіз технологічної пошкодженості бетонів і фібробетонів

Технологічна пошкодженість залежить від параметрів початкових тріщин і є одним з важливих показників, що характеризує структуру бетону як композиційного грубогетерогенного матеріалу. Пошкодженість відображує

характер розподілу тріщин в композиційному матеріалі [166]. Цементні композиції можна уявити як висококонцентровані ліофобні грубодисперсні системи з ліофільною межею розділу фаз [167]. В таких системах розвиток тріщин обумовлено спонтанною організацією структури та визначає шляхи їх вірогідних трансформацій. Тобто тріщини можна вважати самостійними елементами, які динамічно зв'язують окремі структурні частини композиту в одну цілісність [59].

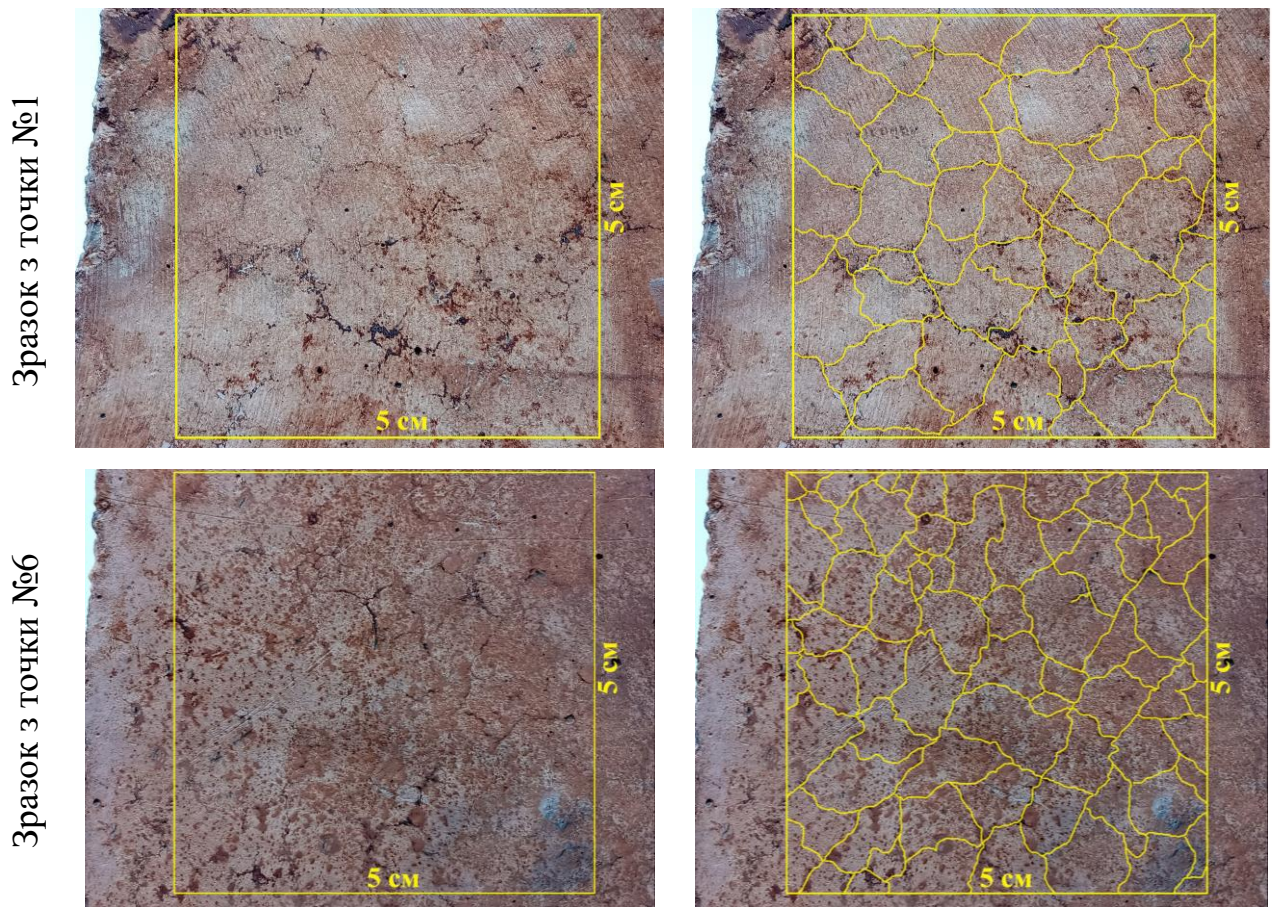


Рис.4.11. Приклади визначення технологічної пошкоженості зразків бетонів

На зразках досліджених бетонів і фібробетонів у віці 1-го року були визначені значення коефіцієнтів технологічної пошкоженості за площею K_{Π} (см/см²). Для їх визначення в кожній точці плану експерименту відбиралося 2 зразка, на кожному зі зразків аналізувалося 2 грані, що не були верхніми або нижніми при формуванні зразку. Верхні та нижні грані не можна вважати показовими через залежність проявлення на них технологічних тріщин від

якості загладжування поверхні зразку при формуванні. На поверхнях, оброблених тоніном, для визначення величини K_{Π} по цифровим фото відокремлювалася ділянка розміром 5×5 см, на якій вимірювалася довжина проявлених технологічних тріщин (рис.4.11). Витримування зразків протягом року забезпечувало необхідну для проявлення технологічних тріщин карбонізацію їх зовнішнього шару. Усередненні значення K_{Π} у 18 контрольних точках експерименту наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Коефіцієнт технологічної пошкодженості K_{Π} (см/см²)
зразків бетонів і фібробетонів

№	В/Ц		№	В/Ц
1	2,69		10	3,01
2	2,73		11	2,76
3	2,62		12	2,66
4	2,93		13	3,01
5	2,93		14	2,77
6	3,15		15	2,66
7	3,08		16	3,20
8	3,11		17	2,76
9	2,92		18	2,74

За даними, наведеними у таблиці 4.4, була побудована ЕС-модель, що описує вплив варійованих факторів складу на величину коефіцієнта технологічної пошкодженості досліджених бетонів і фібробетонів:

$$\begin{aligned}
K_{\Pi}(\text{см/см}^2) = & 2,70 + 0,13x_1 - 0,05x_1^2 - 0,03x_1x_2 + 0,02x_1x_3 - 0,03x_1x_4 \\
& - 0,02x_2 + 0,13x_2^2 \qquad \qquad \qquad \pm 0x_2x_3 - 0,04x_2x_4 \\
& + 0,02x_3 + 0,13x_3^2 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad + 0,05x_3x_4 \\
& - 0,09x_4 \pm 0x_4^2
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Для ЕС-моделі (4.5) поле властивостей має мінімальне значення $K_{\Pi.\min} = 2,44 \text{ см/см}^2$ у точці з координатами $x_1 = -1$, $x_2 = 0,13$, $x_3 = -0,16$, $x_4 = 1$, що відповідає складам з мінімальною кількістю портландцементу, кількістю поліпропіленової фібри приблизно $1,1 \text{ кг/м}^3$, метакаоліну 13 кг/м^3 та з максимальною кількістю полікарбосилатної добавки комплексної дії. Максимальне значення $K_{\Pi.\max} = 3,18 \text{ см/см}^2$ мають склади у точці з координатами $x_1 = 1$, $x_2 = x_3 = x_4 = -1$, тобто при максимальній кількості портландцементу, без фібри і мета каоліну та при мінімальній кількості добавки комплексної дії.

За ЕС-моделлю (4.5) були побудовані однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів складу на технологічну пошкодженість бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів (рис.4.12).

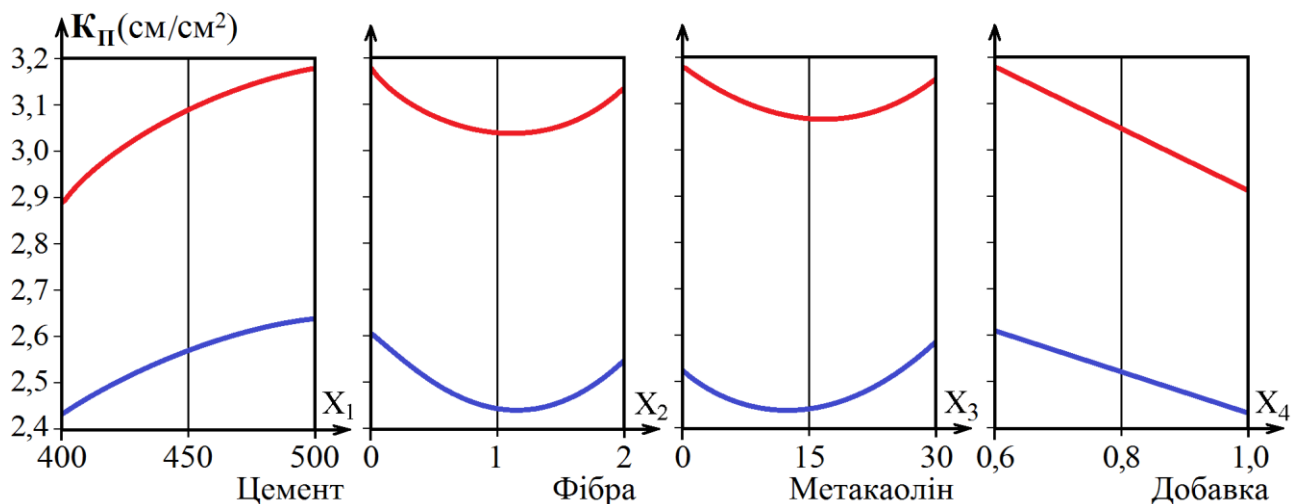


Рис.4.12. Вплив варійованих факторів складу на коефіцієнт технологічної пошкодженості бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів

Аналіз діаграм показує, що при збільшенні кількості портландцементу у складі бетону значення коефіцієнта технологічної пошкодженості композиту відчутно зростає. Це можна прояснити тим, що більша кількість в'язучого у складі бетону вимагає введення більшої кількості води у суміш (попри зниження В/Ц), що впливає на об'ємні деформації при структуроутворенні. При підвищенні кількості добавки полікарбосилатного типу в межах факторного простору експерименту значення коефіцієнту технологічної пошкодженості досліджених бетонів і фібробетонів лінійно знижується, що можна пояснити впливом модифікатора на В/Ц суміші.

Для більш детального аналізу впливу кількості портландцементу, фібри і метакаоліну на коефіцієнт технологічної пошкодженості досліджених бетонів і фібробетонів за ЕС-моделлю (4.5) була побудована діаграма у вигляді кубу, наведена на рис.4.13. Її аналіз показує, що незалежно від кількості в'язучого найменші значення коефіцієнту технологічної пошкодженості мають склади фібробетонів з кількістю фібри $1..1,2 \text{ кг/м}^3$ і метакаоліну $14..18 \text{ кг/м}^3$. Це можна пояснити особливістю впливу даних факторів на об'ємні деформації бетону в процесі структуроутворення, а саме на формування і розвиток технологічних тріщин та внутрішніх поверхонь розділу [59]. Зокрема волокна дисперсної арматури здатні утримувати розвиток тріщин як структурних елементів та зменшувати величину об'ємних деформацій композиційного матеріалу.

Таким чином, проведений аналіз технологічної пошкодженості досліджених бетонів і фібробетонів підтвердив характер впливу застосованих модифікаторів і дисперсного армування на процеси структуроутворення композиту. Також було виявлено кількість добавки та метакаоліну, при яких об'ємні деформації бетону, що твердіє, викликають утворення меншої кількості технологічних тріщин та внутрішніх поверхонь розділу.

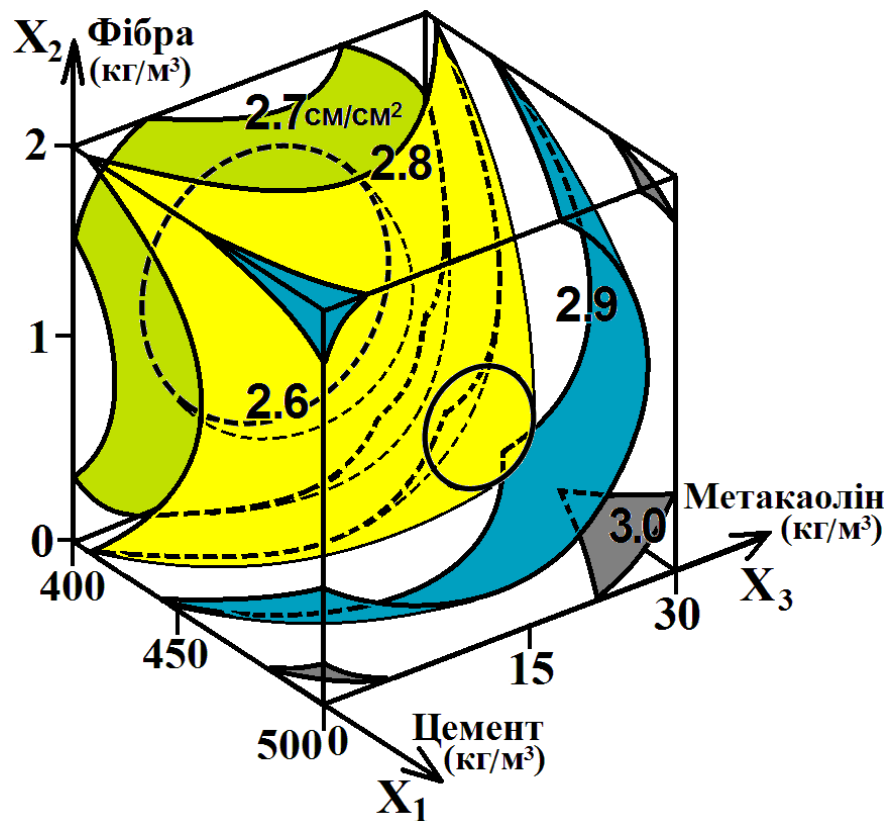


Рис.4.13. Вплив кількості портландцементу, фібри і метакаоліну на коефіцієнт технологічної пошкоженості бетонів і фібробетонів ($x_4=0$)

4.6 Мікроскопічний аналіз структури бетонів і фібробетонів

Структура досліджених бетонів і фібробетонів була також проаналізована за допомогою металографічного оптичного мікроскопа Sigeta в режимі кольорового зображення. Був проведений мікроскопічний аналіз фрагментів зразків досліджених бетонів. Фотозйомка велася цифровою фотокамерою мікроскопу при збільшеннях $\times 50$ і $\times 100$. Окремі приклади отриманих оптичних кольорових мікрофото структури фібробетонів складів №1, №6 і №14 наведені на рис.4.14, структури не армованих фіброю бетонів складів №8, №9 і №15 – на рис.4.15.

Аналіз фото дозволяє сказати, що пори в розчинній частині бетонів і фібробетонів мають переважно незначні розміри і рівномірно розподілені у об'ємі. Цементно-піщана матриця бетонів (рис.4.15) і фібробетонів (рис.4.14)

щільно прилягає до зерен крупного заповнювача. Волока фібри (рис.4.14) рівномірно розподілені у структурі фібробетонів і якісно защемлені цементно-піщаною матрицею і крупним заповнювачем.

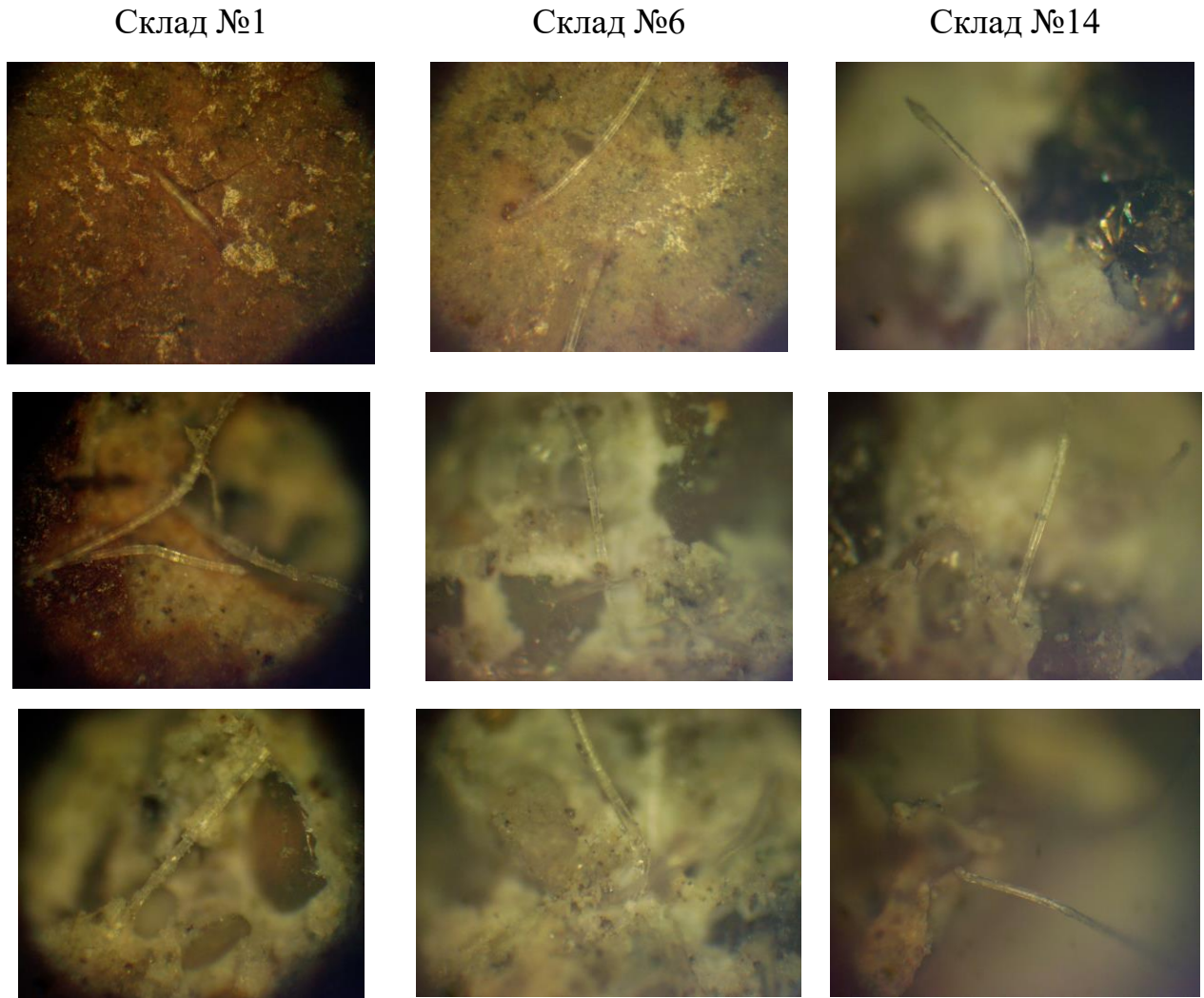


Рис.4.14. Приклади оптичних мікрофото структури фібробетонів складів №1, №6 і №14

Таким чином, проведений мікроскопічний аналіз структури бетонів і фібробетонів підтвердив ефективність використання модифікаторів і дисперсного армування як рецептурних методів управління структурою і властивостями бетонів жорстких дорожніх покриттів.

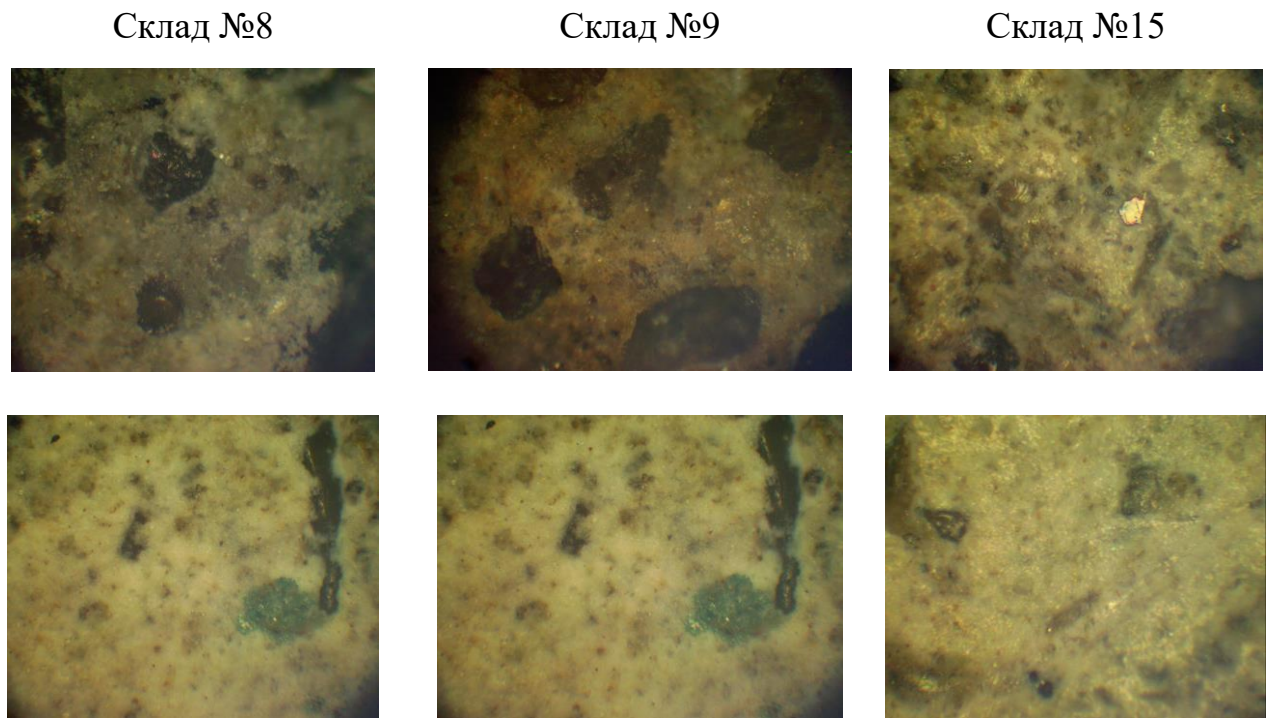


Рис.4.15. Приклади оптичних мікрофото структури бетонів складів №8, №9 і №15

Висновки за 4-м розділом

1. За рахунок дисперсного армування морозостійкість бетонів жорстких дорожніх покриттів зростає на 50 циклів і більше. Аналогічне зростання рівня F досягається при підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 до 0,8-0,9% від маси цементу. Модифіковані раціональною кількістю добавки і метакаоліну фібробетони жорстких дорожніх покриттів в залежності від кількості портландцементу у складі мають морозостійкість від $F350$ до $F450$ (аналогічно рівню $F150$ для «Бетонів дорожніх і аеродромних покриттів» згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96), що забезпечує їх достатню довговічність в умовах багаторазового заморожування і відтаювання.

2. За рахунок введення поліпропіленової фібри стиранність бетону знижується на 22..35% (0,11-0,16 г/см²). При підвищенні кількості портландцементу до 500 кг/м³ стиранність бетону знижується на 0,07-0,10 г/см².

Модифіковані фібробетони при використанні раціональної кількості поліпропіленової фібри і добавки Coral ExpertSuid-5 мають стиранисть на рівні 0,30-0,35 г/см², що забезпечує виску зносостійкість дорожнього покриття.

3. За рахунок використання комплексної модифікації раціональною кількістю добавки полікарбоксилатного типу Coral ExpertSuid-5 (0,8-0,9%) і метакаоліна (16-18 кг/м³) досліджені бетони і фібробетони мають в залежності від кількості в'язучого водонепроникність від W10 до W14, що забезпечує високу стійкість жорстких дорожніх покриттів до дії агресивних речовин. Кількість поліпропіленової фібри несуттєво впливає на рівень W бетонів.

4. На відкриту пористість бетонів і фібробетонів найбільш суттєво впливає кількість полікарбоксилатної добавки Coral ExpertSuid-5. При підвищенні кількості добавки з 0,6% до 0,9..1% пористість знижується на 0,8..0,9%. При застосуванні 1,5..2 кг/м³ поліпропіленової фібри відкрита пористість бетонів підвищується в середньому на 0,4%. За рахунок використання раціональної кількості полікарбоксилатної добавки Coral ExpertSuid-5 (0,8.0,9%) і метакаоліну (15..20 кг/м³) незалежно від кількості в'язучого і дисперсної арматури відкрита пористість бетонів жорстоких дорожніх покриттів знаходиться в межах 4..4,5%.

5. Рентгенофазовий аналіз структури досліджених бетонів і фібробетонів підтвердив ефективність впливу використаних модифікаторів, зокрема позитивну роль метакаоліну як активної пуцолани. Про це свідчить зменшення рефлексів Са(ОН)₂ в 1,5 рази з утворенням гідросилікатів кальцію та гексагональних гідроалюмінатів кальцію типу С₄АН₁₃.

6. Незалежно від кількості в'язучого найменші значення коефіцієнту технологічної пошкодженості мають склади фібробетонів з кількістю фібри 1..1,2 кг/м³ і метакаоліну 14..18 кг/м³, що можна пояснити особливістю впливу даних факторів на формування і розвиток технологічних тріщин та внутрішніх поверхонь розділу.

7. Мікроскопичний аналіз структури показав, що пори в розчинній частини бетонів і фібробетонів мають переважно незначні розміри і рівномірно

розподілені у об'ємі, цементно-піщана матриця щільно прилягає до зерен крупного заповнювача а волокна фібри рівномірно розподілені у структурі фібробетонів і якісно зацемлені цементно-піщаною матрицею і крупним заповнювачем.

8. Результати досліджень, які викладені у даному розділі, опубліковані у роботах [168-173].

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів

Вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів проводився з використанням комплексу отриманих у процесі досліджень та наведених у розділах 3 і 4 ЕС-моделей, що описують вплив складу на властивості композиту [148]. Вибір здійснювався графічним методом на діаграмах типу «квадрати на квадрати».

Проводився вибір складів фібробетонів з двома різними рівнями вимог до характеристик матеріалу. В першому варіанті (бетони класу С30/35) у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення фізико-механічних характеристик бетонів (рис.5.1):

- міцність на стиск $f_{ck.cube} \geq 50$ МПа. Така міцність при найбільш розповсюдженому рівні коефіцієнта варіації для бетонних заводів України і Молдови забезпечую клас бетону С30/35, що дозволяє використовувати його на дорогах категорій до І-б (В35, М500 за вимогами ДБН В.2.3-4:2015 [12]. На діаграмах ізолінії $f_{ck.cube} = 50$ МПа побудовані за ЕС-моделлю (3.4) і відображені червоним кольором;

- міцність на розтяг при згині $f_{ctk} \geq 8$ МПа. Така міцність на розтяг забезпечує якість роботи матеріалу в конструкції дорожнього одягу і в значній мірі забезпечує довговічність бетону при впливах високих навантажень, що показано вище. На діаграмах ізолінії $f_{ctk} = 8$ МПа побудовані за ЕС-моделлю (3.8) і відображені зеленим кольором;

- морозостійкість $\geq F350$. Такий рівень морозостійкості забезпечує високу довговічність бетону при експлуатації дорожніх покриттів у кліматичних умовах, які є характерними для України і Молдови. На діаграмах ізолінії F350 побудовані за ЕС-моделлю (4.1) і відображені синім кольором;

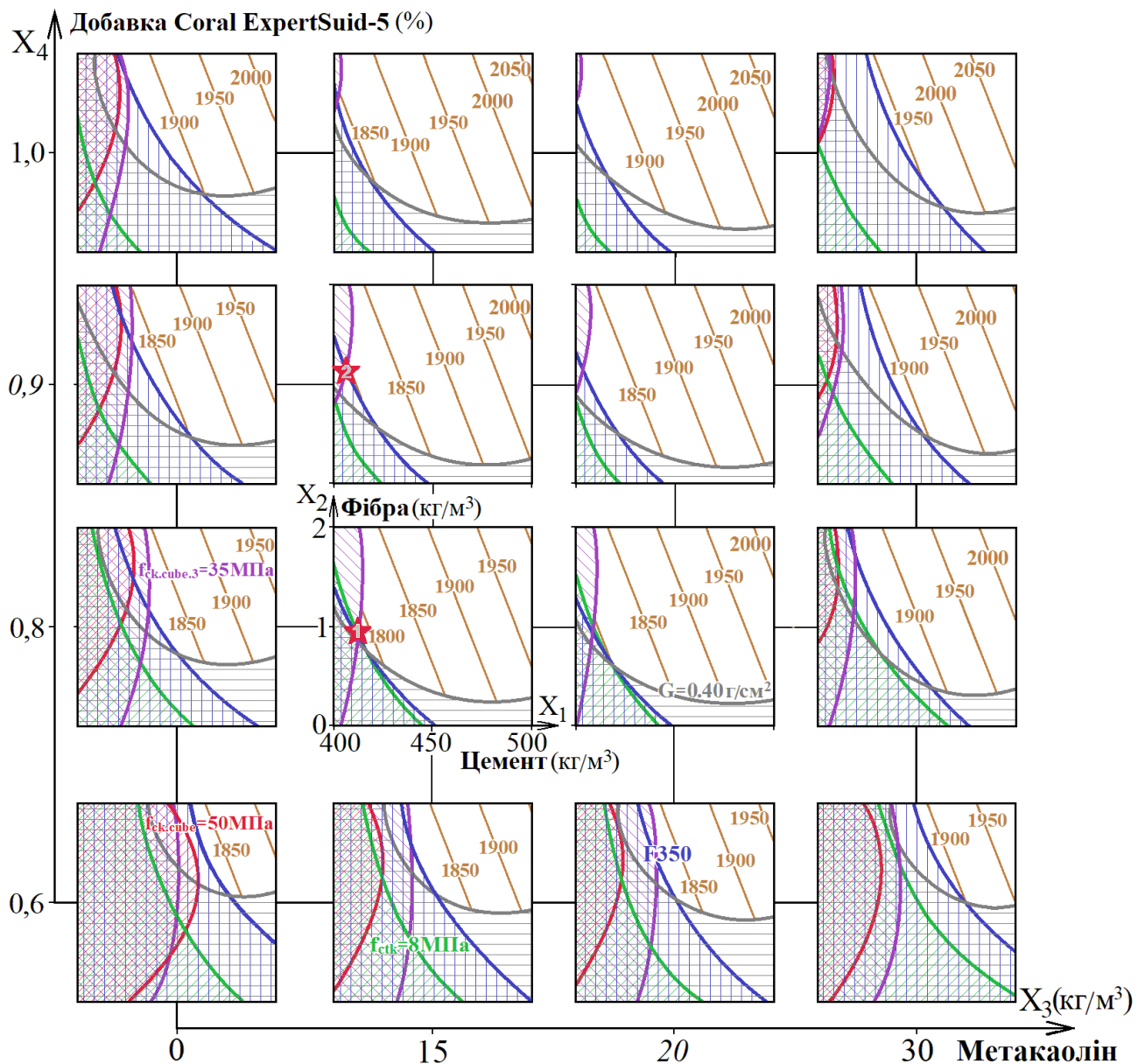


Рис.5.1. Вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів класу С30/35

- стиранність $G \leq 0,40$ г/см². Такий рівень стиранності (не більше 0,40 г/см²) забезпечує високу зносостійкість бетону, відповідно його довговічність в умовах інтенсивного руху транспорту. На діаграмах ізолінії $G = 0,40$ г/см² побудовані за ЕС-моделлю (4.2) і відображені сірим кольором;

- міцність на стиск у віці 3х діб $f_{ck.cube.3} \geq 35$ МПа. Такий рівень ранньої міцності є високим, що дає можливість раніше розпочинати експлуатацію доріг та полегшує виконання подальших технологічних операцій в процесі

будівництва. На діаграмах ізолінії $f_{ck.cube.3} = 35$ МПа побудовані за ЕС-моделлю (3.2) і відображені фіолетовим кольором.

У якості критерію оптимізації [143] використовувався показник собівартості бетону (грн./м³), розрахований в цінах березня 2020 року. Показник собівартості був розрахований у 18-ти експериментальних точках, потім за цими даними була побудована відповідна ЕС-модель. Ізолінії собівартості бетону показані на діаграмах коричневим кольором.

При побудові діаграм типу «квадрати на квадраті» в якості несучого використовувався квадрат у координатах X_3 (кількість метакаоліну) – X_4 (кількість добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5), що аналогічно всім показаним у розділах 3 і 4 діаграм такого типу. Вплив кількості портландцементу і поліпропіленової фібри при різних рівнях факторів x_3 - x_4 відображають діаграми у полі несучого квадрату. При цьому з врахуванням того, що як показано вище для значної частини показників якості найкращі показники (найбільша міцність, найбільша морозостійкість, найменша стиранність і т.п.) спостерігалися для складів з кількістю метакаоліну 18-20 кг/м³ та з кількістю добавки Coral ExpertSuid-5 близько 0,9%, у полі несучого квадрату для точнішого проведення оптимізації показано не 9, а 16 діаграм впливу факторів x_1 - x_2 (рис.5.1). Крім діаграм у основних координатах факторів (-1, 0, +1) додано діаграми у координатах $x_3 = +0,333$ (20 кг/м³ метакаоліну) і $x_4 = +0,5$ (0,9% добавки).

Області діаграм, які не відповідали встановленим критеріям обмеження, заштриховувалися відповідним кольором. У не заштрихованих зонах, тобто при виконанні всіх призначених критеріїв якості, було обрано два оптимальних склади, які на рис.5.1 помічено зірками з відповідними цифрами.

Склад №1 (С30/35) характеризується найменшою собівартістю при забезпеченні необхідних рівнів всіх висунутих критеріїв (1790 грн./м³). Координати точки даного складу у факторному просторі є наступними: $x_1 = -0,6$, $x_2 = -0,1$, $x_3 = 0$, $x_4 = 0$. Вміст компонентів суміші у складі №1 (С30/35) та

розрахункові фізико-механічні властивості даного бетону наведено у таблиці 5.1.

Склад №2 (С30/35) має собівартість 1800 грн./м³, що лише на 0,6% вище, ніж собівартість складу №1. При цьому у порівнянні зі складом №1 бетон складу №2 характеризується дещо вищою міцністю на розтяг при згині та зносостійкістю (меншою стиранністю). Координати точки даного складу у факторному просторі є наступними: $x_1 = -0,7$, $x_2 = 0,1$, $x_3 = 0$, $x_4 = 0,5$. Вміст компонентів суміші у складі №2 (С30/35) та його розрахункові фізико-механічні властивості наведено у таблиці 5.1.

В другому варіанті вибору оптимальних складів (бетони класу С32/40) у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення фізико-механічних характеристик бетонів (рис.5.2):

Таблиця 5.1

Обрані оптимальні склади фібробетонів та їх фізико-механічні характеристики

№ складу	Склад бетону	Фізико-механічні характеристики
С30/35, склад №1	Цемент – 420 кг/м ³ Щебінь – 1127 кг/м ³ Пісок – 676 кг/м ³ Метакаолін – 15 кг/м ³ Фібра – 0,9 кг/м ³ Добавка Coral – 3,36 кг/м ³ Вода – 174 л/м ³	Міцність на стиск $f_{ck.cube} = 54$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{ctk} = 8$ МПа Морозостійкість F350 Стиранність $G = 0,395$ г/см ² Міцність на стиск у віці 3-х діб $f_{ck.cube.3} = 35$ МПа Собівартість – 1790 кг/м ³
С30/35, склад №2	Цемент – 415 кг/м ³ Щебінь – 1131 кг/м ³ Пісок – 686 кг/м ³ Метакаолін – 15 кг/м ³ Фібра – 1,1 кг/м ³ Добавка Coral – 3,74 кг/м ³ Вода – 169 л/м ³	Міцність на стиск $f_{ck.cube} = 54$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{ctk} = 8,2$ МПа Морозостійкість F350 Стиранність $G = 0,38$ г/см ² Міцність на стиск у віці 3-х діб $f_{ck.cube.3} = 35$ МПа Собівартість – 1800 кг/м ³

Продовження таблиці 5.1

№ складу	Склад бетону	Фізико-механічні характеристики
С32/40, склад №1	Цемент – 435 кг/м ³ Щебінь – 1124 кг/м ³ Пісок – 669 кг/м ³ Метакаолін – 15 кг/м ³ Фібра – 1,4 кг/м ³ Добавка Coral – 3,92 кг/м ³ Вода – 175 л/м ³	Міцність на стиск $f_{ck.cube} = 57$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{ctk} = 8,5$ МПа Морозостійкість F400 Стиранність $G = 0,34$ г/см ² Міцність на стиск у віці 3-х діб $f_{ck.cube.3} = 38$ МПа Собівартість – 1860 кг/м ³
С32/40, склад №2	Цемент – 433 кг/м ³ Щебінь – 1124 кг/м ³ Пісок – 665 кг/м ³ Метакаолін – 20 кг/м ³ Фібра – 1,5 кг/м ³ Добавка Coral – 3,90 кг/м ³ Вода – 176 л/м ³	Міцність на стиск $f_{ck.cube} = 58$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{ctk} = 8,6$ МПа Морозостійкість F400 Стиранність $G = 0,34$ г/см ² Міцність на стиск у віці 3-х діб $f_{ck.cube.3} = 39$ МПа Собівартість – 1865 кг/м ³

- міцність на стиск $f_{ck.cube} \geq 55$ МПа, що забезпечує необхідний клас бетону на дорогах категорії I-а (B40, M550 за вимогами ДБН В.2.3-4:2015 [12]), тобто дозволяє використовувати бетон на дорогах з найбільшими навантаженнями. За даними [18] при будівництві нових автодоріг перевагу завжди необхідно віддавати покриттям з високоміцного бетону, класів B40..B60, що забезпечує їх довговічність.

Ізолінії $f_{ck.cube} = 55$ МПа на діаграмах відображені червоним кольором;

- міцність на розтяг при згині $f_{ctk} \geq 8,5$ МПа, що на 0,5 МПа циклів вище, ніж задавалося у якості критерію обмеження при виборі бетонів класу С30/35. Це забезпечує вищу у порівнянні з бетонами класу С30/35 якість та довговічність роботи матеріалу в конструкції дорожнього одягу. Ізолінії $f_{ctk} = 8,5$ МПа на діаграмах відображені зеленим кольором;

- морозостійкість $\geq F400$, що на 50 циклів вище, ніж задавалося у якості критерію обмеження при виборі бетонів класу С30/35. Це забезпечую ще більшу довговічність бетонів при експлуатації у кліматичних умовах України і Молдови. Ізолінії F400 на діаграмах відображені синім кольором;

- стиранність $G \leq 0,35 \text{ г/см}^2$, що на $0,05 \text{ г/см}^2$ нижче вище, ніж задавалося у якості критерію обмеження при виборі бетонів класу С30/35 і забезпечує більш високу зносостійкість в умовах інтенсивного руху транспорту. Ізолінії $G = 0,35 \text{ г/см}^2$ на діаграмах відображені сірим кольором;

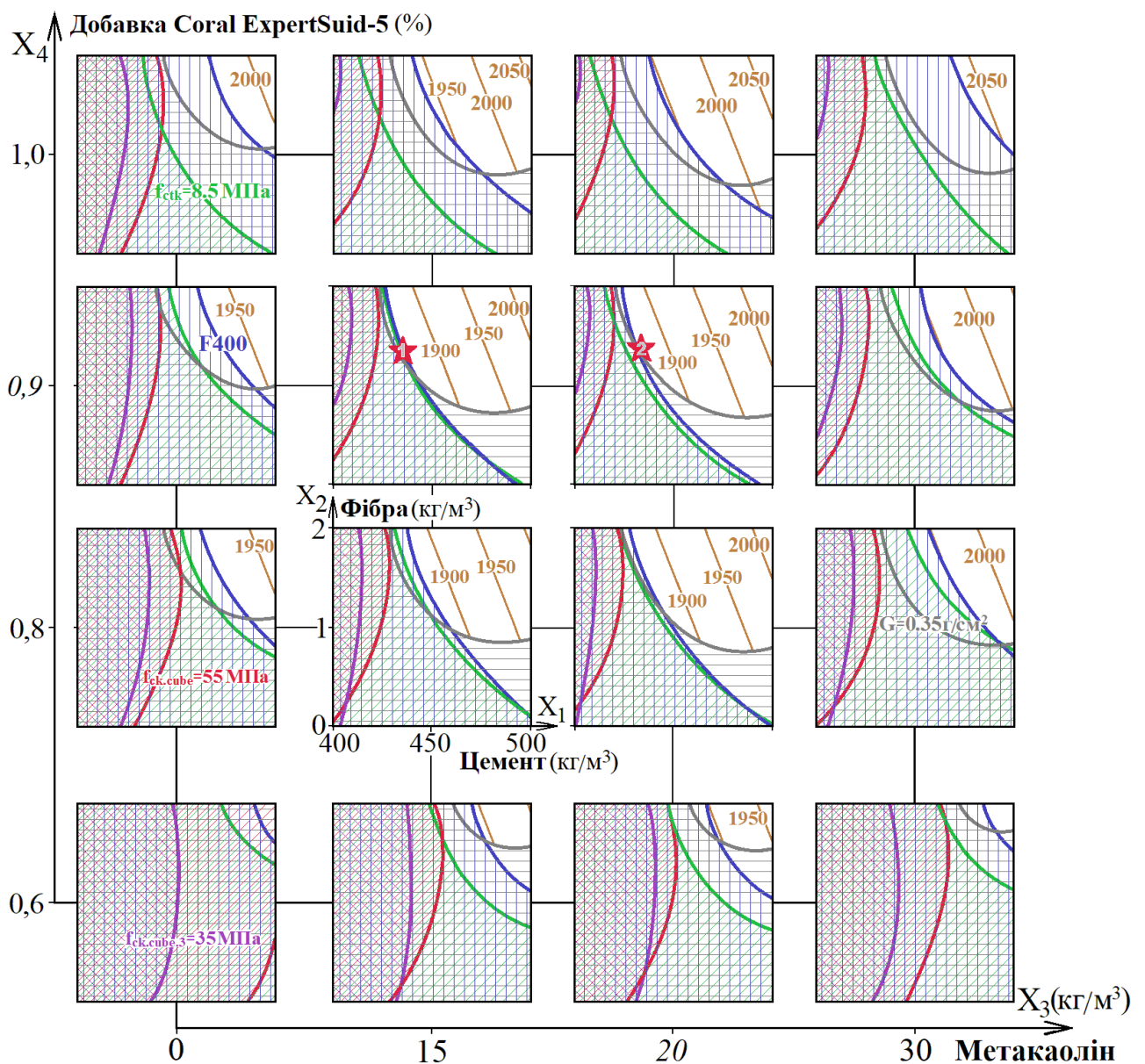


Рис.5.2. Вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів класу С32/40

- міцність на стиск у віці 3х діб $f_{ck.cube.3} \geq 35$ МПа, що аналогічно обмеженням при виборі складів бетонів класу С30/35 і також дає можливість раніше розпочинати експлуатацію доріг та полегшує виконання подальших технологічних операцій. Ізолінії $f_{ck.cube.3} = 35$ МПа на діаграмах відображені фіолетовим кольором.

Побудова ізоліній, що відображають зміну всіх наведених на рис.5.2 властивостей бетону, проводилася за ЕС-моделями, за якими аналогічні ізолінії будувалися на рис.5.1.

На рис.5.2 у не заштрихованих зонах, тобто при забезпеченні рівня всіх призначених критеріїв якості, що аналогічно рис.5.1, було обрано два оптимальних склади, які помічено зірками з відповідними цифрами.

Склад №1 (С32/40) характеризується найменшою собівартістю при забезпеченні необхідних рівнів всіх висунутих критеріїв (1860 грн./м³). Координати точки даного складу у факторному просторі є наступними: $x_1 = -0,3$, $x_2 = 0,4$, $x_3 = 0$, $x_4 = 0,5$. Вміст компонентів суміші у складі №1 (С32/40) та розрахункові фізико-механічні властивості бетону наведено у таблиці 5.1.

Склад №2 (С32/40) має собівартість 1865 грн./м³, що фактично не відрізняється від собівартість складу №1. При цьому у порівнянні зі складом №1 бетон складу №2 характеризується дещо вищою міцністю на стиск і на розтяг при згині. Різниця між показниками властивостей складу №2 і №1 знаходиться у межах точності експерименту, але для складу №2 ця дозволяє казати про досягнення заданого рівня міцності з більшою вірогідністю. Координати точки даного складу у факторному просторі є наступними: $x_1 = -0,35$, $x_2 = 0,5$, $x_3 = 0,33$, $x_4 = 0,5$. Вміст компонентів суміші у складі №2 (С32/40) та його розрахункові фізико-механічні властивості наведено у таблиці 5.1.

Таким чином, з використанням отриманого комплексу ЕС-моделей та з врахуванням собівартості обрано оптимальні склади фібробетонів жорстких дорожніх покриттів класів С30/35 і С32/40 з підвищеною в типових умовах експлуатації довговічністю та високою ранньою міцністю.

5.2 Технології приготування і застосування модифікованого бетону для покриттів автодоріг із застосуванням поліпропіленової фібри

В рамках даної роботи крім складів модифікованих бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з підвищеною міцністю, зокрема у ранні строки, підвищеної морозостійкістю, зносостійкістю та водонепроникністю розроблялися оптимальні технологічні прийоми виготовлення і застосування даних матеріалів при влаштуванні покриттів автомобільних доріг.

Був розроблений «Регламент з технології приготування і застосування модифікованого бетону для покриттів автодоріг із застосуванням поліпропіленової фібри», який був затверджений у Одеському дочірньому підприємстві «Облавтодор» державної акціонерної компанії «Автомобільні дороги України». Титульні сторінки затвердженого регламенту наведені у додатку Б.

Описана у регламенті технологія може застосовуватися при виготовленні верхнього шару жорстких двошарових покриттів або для одношарових жорстких покриттів автомобільних доріг.

Розроблена технологія регламентує використання портландцементів марки 400 і вище (активністю 40 МПа і більш), які задовольняють вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 «Цементи загальнобудівельного призначення». Рекомендується використання портландцементів Типу I (клінкерних) і Типу II (з мінеральними добавками від 6% до 35%).

В якості дрібного заповнювача регламентується використання природного кварцового піску з зернами фракцій від 0.15 до 5 мм, задовольняючого вимогам ДСТУ Б В.2.7.-32-95 «Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт». Для забезпечення морозостійкості бетону вміст мулистих та глинистих домішок у піску має бути не більше 1%.

В якості крупного заповнювача регламентується використання гранітного щебеню, одержаного дробленням гірських порід, крупною від 5 до 20 мм. Щебінь має відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 «Щебінь і гравій щільні

природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови».

Для дисперсного армування бетонів розроблена технологія регламентує використання поліпропіленової фібри «MicroArm» з довжиною волокон 12 мм і діаметром 20 мкм (виробництва ТОВ «ДПФ», м. Дніпро), яка відповідає вимогам EN 14889-2:2006 «Fibres for concrete Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity», або аналогічної за властивостями і геометричними параметрами фібри.

Для покращання рухливості суміші та фізико-механічних характеристик бетонів для покриттів автомобільних доріг із застосуванням поліпропіленової фібри в склад сумішей рекомендується вводити хімічну добавку полікарбосилатного типу суперпластифікатор Coral ExpertSuid 5 (виробництва компанії Coral, м. Запоріжжя), яка відповідає вимогам ТУ У В.2.7-24.6-35365973-001:2008.

Для покращання фізико-механічних характеристик бетонів для покриттів автомобільних доріг із застосуванням поліпропіленової фібри в склад сумішей розроблена технологія рекомендує вводити активну мінеральну добавку метакаолін (виробництва ТОВ «Західна каолінова компанія», Рівненська область), яка відповідає вимогам ТУ У В.2.7-08.1-31108661-001:2014 «Добавка мінеральна до бетонів та розчинів – метакаолін високоактивний. Технічні умови».

Рухомість бетонної суміші рекомендується підтримувати на рині S2.

Розроблена технологія регламентує приготування сумішей модифікованих бетонів для покриттів автомобільних доріг із застосуванням поліпропіленової фібри у бетонозмішувачах примусового типу. Дозування портландцементу, щебеню піску, фібри і метакаоліну необхідно проводити по масі, води і добавки – за об'ємом (з врахуванням середньої густини добавки $1,08 \pm 0,01$ г/см³). Відхилення фактичного дозування від заданої не повинне перевищувати: для цементу, води, фібри, метакаоліну і добавки $\pm 1.0\%$, для заповнювачів (піску і щебеню) $\pm 2.0\%$.

З метою рівномірного розподілу поліпропіленової фібри у суміші розроблена технологія регламентує завантаження компонентів у бетонозмішувачів в наступній послідовності: щебінь, фібра, пісок, метакаолін. Після цього слід провести сухе перемішування цих компонентів протягом 2..3 хвилин. Далі у суміш подається цемент, далі вода з введеною до неї добавкою. Після подачі води слід перемішувати суміші модифікованого модифікованих бетонів не менше 3 хвилин.

При укладанні покриттів автомобільних доріг для ущільнення суміші модифікованого бетону із застосуванням поліпропіленової фібри рекомендується використовувати поверхневі вібратори або віброрейки з частотою коливань 50-120 Гц (3000-7000 кол./хв.). Момент закінчення вібрації визначається по появі на поверхні свіжоукладеного бетону цементного молока і по припиненню виділення з бетонної суміші пухирців повітря.

Для створення сприятливих умов набору міцності модифікованого бетону у покриттях автомобільних доріг слід по можливості вжити заходів, що оберігають його від висихання і безпосередньої дії сонця і вітру. Для цього розроблена технологія рекомендує поверхню покриття одразу після укладання і ущільнення обробляти водною дисперсією полімерів методом розпилювання при використанні форсунок, що утворюють плоский факел. За рахунок обробки на поверхні свіжого бетону має утворитися запірна водонепроникна захисна плівка. Для обробки можуть використовуватися такі водні дисперсії полімерів, як Curing 99, Памороль, Маресуре S або інші аналогічні за принципом дії. При влаштуванні покриттів в сухих спекотних умовах (температура вище 26°C, вологість нижче 80%) обробка водною дисперсією полімерів є обов'язковою.

Також розроблена технологія регламентує вимоги щодо безпеки при проведенні робіт, метрологічного забезпечення виробництва, а також охорони природи.

Результати досліджень, виконаних в рамках підготовки даної дисертаційної роботи, використовуються в Одеській державній академії будівництва та архітектури при підготовці дипломних робіт магістрів, а також у

курсах лекцій освітніх компонентів «Наукові основи довговічності автомобільних доріг та аеродромів» і «Будівництво та експлуатація автомобільних доріг» освітньо-професійної програми «Автомобільні дороги і аеродроми та транспортні системи» підготовки магістрів спеціальність 192 - Будівництво та цивільна інженерія. Довідка про впровадження результатів наукових досліджень в навчальний процес наведена у Додатку В.

Висновки за 5-м розділом

1. З використанням комплексу отриманих ЕС-моделей обрано оптимальні склади фібробетонів жорстких дорожніх покриттів класів С30/35 і С32/40. Обрані з врахуванням собівартості склади забезпечують необхідну міцність фібробетонів при підвищеній в типових умовах експлуатації довговічності та високому рівні ранньої міцності.

2. Розроблено «Регламент з технології приготування і застосування модифікованого бетону для покриттів автодоріг із застосуванням поліпропіленової фібри», який був затверджений у Одеському дочірньому підприємстві "Облавтодор" державної акціонерної компанії «Автомобільні дороги України».

3. Результати досліджень використовуються в освітньому процесі в Одеській державній академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів спеціальності 192 - Будівництво та цивільна інженерія за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми та транспортні системи».

4. Результати досліджень, які викладені у даному розділі, опубліковані у роботах [172, 173].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За рахунок застосування полікарбоксилатного модифікатору комплексної дії, метакаоліну як добавки пуцоланового типу, а також дисперсного армування отримано фібробетони жорстких дорожніх покриттів з підвищеною міцністю, зокрема у ранні терміни твердіння, морозостійкістю і зносостійкістю, що забезпечує їх високу довговічність в типових умовах експлуатації.

2. В/Ц бетонних сумішей рівної рухомості залежить від складу бетонів жорстких дорожніх покриттів і варіюється від 0,332 до 0,515. Введення поліпропіленової фібри і метакаоліну викликає необхідність підвищення В/Ц для збереження рухомості суміші. Підвищення кількості портландцементу до 500 кг/м^3 і модифікатору комплексної дії Coral ExpertSuid-5 до 0,9..1% відчутно знижує В/Ц суміші.

3. З використанням методів планування експерименту встановлено, що при підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid-5 до 0,9-1% і застосуванні метакаоліну у кількості $15..20 \text{ кг/м}^3$ міцність на стиск бетонів і фібробетонів зростає на 15-16 МПа, при цьому вже у віці 3-х діб міцність модифікованих бетонів на 11-12 МПа більше міцності бетонів з мінімальною кількістю добавки. Міцність модифікованих фібробетонів у віці 3-х діб досягає 50 МПа, у марочному віці – 71 МПа. За рахунок використання комплексної модифікації та дисперсного армування поліпропіленовою фіброю міцність на розтяг при згині бетонів дорожніх покриттів зростає на 1,2..1,4 МПа. Міцність модифікованих бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у віці 3-х діб складає 75..80% від міцності даних бетонів у 28-ми денному віці. Розроблені бетони і фібробетони в залежності від кількості портландцементу у складі відповідають класам від С30/35 до С40/50.

4. За рахунок дисперсного армування і підвищенні кількості добавки комплексної дії Coral ExpertSuid 5 до 0,9% морозостійкість бетонів жорстких дорожніх покриттів зростає в середньому на 100 циклів. За рахунок введення

поліпропіленової фібри стиранність бетону знижується на 22..35%. Модифіковані фібробетони при використанні раціональної кількості поліпропіленової фібри, добавки Coral ExpertSuid-5 і метакаоліну мають морозостійкість від F350 до F450 (аналогічно рівню F150 для «Бетонів дорожніх і аеродромних покриттів»), водонепроникність від W10 до W14 і стиранність від 0,30 до 0,35 г/см², що забезпечує високу довговічність.

5. При підвищенні кількості добавки Coral ExpertSuid-5 до 0,9..1% відкрита пористість бетонів знижується на 0,8..0,9%, при застосуванні 1,5..2 кг/м³ поліпропіленової фібри – підвищується в середньому на 0,4%. За рахунок використання раціональної кількості полікарбоксилатної добавки і метакаоліну відкрита пористість бетонів жорстких дорожніх покриттів знаходиться в межах 4..4,5%.. Рентгенофазовий аналіз структури підтвердив позитивну роль метакаоліну як активної пуцолани. Мікроскопічний аналіз показав, що пори в бетонах і фібробетонах мають переважно незначні розміри і рівномірно розподілені у об'ємі, а волокна фібри рівномірно розподілені у структурі. Найменші значення коефіцієнту технологічної пошкодженості мають фібробетони з кількістю фібри 1..1,2 кг/м³ і метакаоліну 14..18 кг/м³.

6. З врахуванням собівартості обрано оптимальні склади фібробетонів жорстких дорожніх покриттів класів C30/35 і C32/40, які забезпечують необхідну міцність при підвищеній в типових умовах експлуатації довговічності та при високому рівні ранньої міцності.

7. Результати досліджень впроваджено у виробництві. Розроблено і затверджено в державній акціонерній компанії «Автомобільні дороги України» «Регламент з технології приготування і застосування модифікованого бетону для покриттів автодоріг із застосуванням поліпропіленової фібри». Також результати досліджень використовуються в освітньому процесі Одеської державної академії будівництва та архітектури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сайт асоціація «Транспортні, експедиторські та логістичні організації в Україні «Укрзовніштранс»» [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://atfl.org.ua/ua/news/chastka-avtomobilnyh-vantazhoperevezen-zbilshytsya-do-35-glava-uza>. Дата звернення 13.06.2020.
2. Мікловда В.П., Шевчук Я.В. Сучасний стан та рівень розвитку автомобільної інфраструктури України. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка». 2011, Вип. 32, С. 6-13.
3. Проблеми оцінки транспортно-експлуатаційного стану та напрямки модернізації мережі автомобільних доріг в Україні / Пасічник А.М., Лебідь Є.М., Клен О.М., Мірошніченко С.В. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2017, № 3 (233), С. 150-158.
4. Степура В.С., Белятинський А.О., Кужель Н.В. Основи експлуатації автомобільних доріг і аеродромів. К.:НАУ, 2013. 204 с.
5. Гідротехнічні та дорожні бетони / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.С. Дорофєєв, А.В.Мішутін. Одеса: Евен, 2012. 214 с.
6. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожних и аэродромных покрытий. М.: Транспорт, 1991. 152 с.
7. Mohod M.V., Kadam K.N. Comparative study on rigid and flexible pavement: a review. IOSR Journal of mechanical and civil engineering (IOSR-JMCE), 2016, Volume 13, Issue 3 Ver. VII, pp. 84-88.
8. Возний С.П. Перспективи розвитку цементобетонних доріг в Україні. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2017. Вип. 6. С. 47-55.
9. Афиногенов О.П. Проектирование жестких дорожных одежд. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. 227 с.
10. Оплачко І.О. Проблеми та перспективи управління діяльністю підприємств цементної промисловості в сучасних умовах. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Економічні науки», 2018, №4(84). С. 119-131.

11. Лазарев Ю.Г., Сеницына Е.Б. Основы совершенствования транспортной инфраструктуры. Техничко-технологические проблемы сервиса, 2013. № 2 (24), С. 92–93.
12. ДБН В.2.3-4-2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2015. 104 с.
13. Радовский Б.С. Цементобетонные покрытия в США: строительство. Автомобильные дороги, 2015, № 4, С. 10-25.
14. Laurent G. Economic comparison between concrete and conventional road pavements in France: 9th International Symposium on Concrete Roads, Istanbul, April 2004. Theme 1. 2004. P. 21-31.
15. Гишман М.Е. Попов В.И. Проектирование транспортных сооружений. М.: Транспорт, 1988. 447 с.
16. Савченко Е.Т. Максин М.О. Анализ целесообразности строительства асфальтобетонных и цементобетонных автомобильных дорожных покрытий. Молодой ученый. 2016, № 21 (125). С. 204-207.
17. Войлоков И.А., Горшков А.С. бетонные дороги: актуальность, возможности и оборудование. Стройпрофиль, 2008, №6(68). С.23-24.
18. Гамеляк І.П., Корецький А.С., Корецький С.С. Про необхідність будівництва в Україні автомобільних доріг із цементобетонним покриттям. Автошляховик України, 2013, №5 (235). С. 24-31.
19. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Київ: Міністерство інфраструктури України, 2016. 70 с.
20. Гамеляк І.П., Дмитриченко А.М., Попелиш І.І. Використання готових ущільнювачів швів в цементобетонних покриттях автомобільних доріг і аеродромів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 2020, №1, С.27-40

21. Возный С.П., Дорошенко Ю.М. Анализ влияния различных факторов на цементобетонное покрытие автомобильных дорог. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016, Вип. 96. С.50-60.
22. Нагайчук В.М., Радовський Б.С. Світовий досвід та сучасні підходи до використання цементобетонного покриття. Дороги і мости. 2020, №21. С.188-200.
23. Толмачев С.Н. Строительство автодорог с цементобетонным покрытием в Украине – реальность сегодняшнего дня. Автомобільні дороги. Будівництво. 2013, №4 (234). С.36-40.
24. Радовский Б.С. Цементобетонные покрытия в США. Дорожная техника: Каталогсправочник. СПб: Славутич, 2009. С. 50-58.
25. Long-life Concrete Pavements in Europe and Canada. K. Hall, D. Dawood, S. Vanikar and other. Report No. FHWA-PL-07-027, American Trade Initiatives, 2007. 69 p.
26. New generation cement concretes. Ideas, design, technology and applications 3 / J. Śliwiński, I. Hager, T. Tracz et al. Cracow: Cracow University of Technology, 2010. 189 p
27. Актуальность и перспективы применения цементобетона в дорожном строительстве. М.Я. Якобсон, А.А. Кузнецова, А.С. Введенская, А.В. Бычков. Системные технологии, 2016, №1(18). С. 132-140.
28. Мишутин А.В., Смолянец В.В., Кровяков С.А. Перспектива использования жестких дорожных покрытий для городских улиц и магистрали «Север-Юг» в Одессе. Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. 2013. №52. С. 176-182.
29. Офіційний сайт державного агентства автомобільних доріг України [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://ukravtodor.gov.ua>. Дата звернення 08.09.2020
30. Гамеляк І.П. Про ефективність використання високоміцного цементобетону для будівництва жорстких покриттів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2011. Вип. 81. С. 30-39.

31. Новини Полтавщини. На Полтавщині бетонна дорога Дніпро-Решетилівка буде завдовжки 79 км [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://np.pl.ua/2020/06/na-poltavshchyni-betonna-dorooha-dnipro-reshetylivka-bude-zavdovzhky-79-km/> Дата звернення 13.08.2020

32. Цементуємо віру в європейську якість українських доріг. Будівельний журнал. 2019, №5 (141). С.34.

33. Вперше за 70 років капітально відремонтована траса Н-14. Сайт служби автомобільних доріг у миколаївській області [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://mk.ukravtodor.gov.ua/press/news/vpershe_za_70_rokiv_kapitalno_vidremontovana_trasa_n-14.html Дата звернення 10.02.2021.

34. Дорога «Ферапонтьєвка-Авдарма» офіційно сдана в експлуатацію [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://gagauzinfo.md/top2/35212-doroga-ferapontevka-avdarma-oficialno-sdana-v-ekspluatatsiyu.html> Дата звернення 23.07.2020

35. Till R.D., Van Portfliet R. European concrete pavement tour. Michigan Department of Transportation, Research Report № R-1462, 1992. 20 p.

36. Шлаколушний бетон для дорожніх основ і покриттів з використанням відходу флотації золотовмісної руди / В.І. Гоц, А.В. Ластівка, І.І. Руденко, Є.В. Волинська. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 33. Рівне:НУВГП, 2016. С. 23-30.

37. Семененко В.С., Смірнова Н.В. Застосування технології укочуваного наджорсткого цементобетону для будівництва автомобільних доріг. Дороги і мости. 2019. Вип. 19-20. С. 138-146.

38. Толмачев С.Н., Солодкий С.Й. Факторы обеспечения долговечности дорожного цементного бетона. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2013, №52. С. 275-280.

39. Дорожні цементобетони на основі модифікованих добавок нової генерації / Ю.М. Собко, Г.Я. Шевчук, Н.І. Топилко, Ю.Л. Новицький. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика

будівництва. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. № 888. С. 133–137.

40. Chen Y., Cen GP., Cui YH. Comparative study on the effect of synthetic fiber on the preparation and durability of airport pavement concrete. *Construction and Building Materials*, 2018, Volume 184, pp. 34-44. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.223

41. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Ніжин: Аспект-Поліграф, 2010. 228 с.

42. Rixom M.R. Mailvaganam N.P. Chemical admixtures for concrete. Third edition. London: E & FN Spon, 1999. 437 p.

43. Коваль С.В. Моделирование и оптимизация состава и свойств модифицированных бетонов. Одесса: Астропринт, 2012. 424 с.

44. Дорошенко Ю.М., Возный С.П. Практические меры по повышению долговечности цементобетонных покрытий для автомобильных дорог. *Дороги і мости*, 2015, №15. С.39-44.

45. ДСТУ Б В.2.7-171:2008. Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови (EN 934-2: 2001, NEQ) К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 62 с.

46. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.

47. Касторных Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы. 2-е изд. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 221 с.

48. Баженов Ю.М. Технология бетонов. 3-е издание. М.: Высшая школа, 2003. 499 с.

49. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: Технопроект, 1998. 768 с.

50. Саницький М.А., Позняк О.Р., Кіракевич І.І., Русин Б.Г. Високофункціональні бетони на основі модифікаторів нової генерації. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*. 2008. № 627. С. 191-197.

51. Neville A. M. Właściwości betonu / Kraków: Polski Cement, 2000. 874 p.
52. Шишко Н.С., Корх О.І., Сопов В.П. Застосування методу щільної упаковки компонентів при проектуванні складу бетону. Будівельні матеріали і виробы. 2018. № 1. С. 21-25
53. Liu J., Yu C., Ran Q., Yang Y. Recent advance of chemical admixtures in concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 124, 2019. – 105834
54. Кропивницька Т.П. Лужноактивовані композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та наномодифіковані бетони на їх основі. Дис. на здобуття наук. ступ. д.т.н. за спец. 05.23.05. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020. 452 с.
55. Розробка бетонів для дорожніх покриттів підвищеної довговічності з використанням добавок полікарбоксилатного типу / Г.Я. Шевчук, О.М. Гуняк, О.П. Гнип, В.М. Мішин. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. №46. С. 371-376.
56. Kryzhanovskiy V.O., Kroviakov S.O. Strength of rigid pavement concretes modified with polycarboxylate admixture on different types of cement. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2020, №79, С.92-98.
57. Застосування добавок полікарбоксилатного типу у виробництві дорожніх бетонів. Г.Я. Шевчук, Ю.М. Собко, М.П. Генсецький, О.П. Гнип, О.А. Чуб / Будівельне виробництво, 2017, № 63/1, С.62-66.
58. Application of natural mineral additives in construction. M. Linek, P. Nita, P. Wolka, W. Zebrowski / 3rd World multidisciplinary earth sciences symposium. 2017. Vol 95. UNSP 022006. DOI: 10.1088/1755-1315/95/2/022006.
59. Суханов В.Г., Выровой В.Н., Коробко О.А. Структура материала в структуре конструкции. Одесса: Полиграф, 2016. 244 с.
60. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, С.М. Чудновский. Под. ред. Л.И. Дворкина. К.: Будівельник, 1991. 136 с.

61. Каприелова С.С., Батраков В.Г., Шейнфелд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива. Бетон и железобетон, 1999, №6. С. 6-10.
62. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. СПб.: Строй-Бетон, 2006. 692 с.
63. Gupta S., Rao V.V.L.K., Sengupta J. Evaluation of polyester fiber reinforced concrete for use in cement concrete pavement works. Road materials and pavement design. 2008, Volume 9, Issue 3. pp. 441-461. doi: 10.3166/RMPD.9.441-461.
64. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони. Л.Й. Дворкін, Є.М. Бабич, В.В. Житковський та ін. Рівне : НУВГП, 2017. 332 с.
65. Busari A., Akinmusuru J., Dahunsi B. Mechanical properties of dehydroxylated kaolinitic clay in self-compacting concrete for pavement construction. Silicon. 2019. Volume 11, Issue 5. pp. 2429-2437. doi: 10.1007/s12633-017-9654-6
66. Salimi J., Ramezani pour A.M., Moradi M.J. Studying the effect of low reactivity metakaolin on free and restrained shrinkage of high performance concrete. Journal of Building Engineering. 2020. Volume 28:101053. doi: 10.1016/j.jobbe.2019.101053.
67. Shetty M.S. Concrete technology. Theory and practice. New Delhi: S. Chand & company ltd, 2000. 624 p.
68. Зоткин А.Г. Бетоны с эффективными добавками. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 160 с.
69. Pandey A. Kumar B. A comprehensive investigation on application of microsilica and rice straw ash in rigid pavement. Construction and building materials. 2020, Volume 252, No. 119053
70. Кирсанова А.А., Крамар Л.Я. Органоминеральные модификаторы на основе метакаолина для цементных бетонов. Строительные материалы. 2013. № 11. С. 54-56.

71. Метакаолин в будівельних розчинах і бетонах. Л.Й. Дворкін, Н.В. Лушнікова, Р.Ф. Рунова, В.В. Троян. К.: КНУБіА, 2007. 216 с.
72. Метакаолин - эффективная минеральная добавка для бетонов / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, В.В. Житковский, А.Р. Разумовский. Технологии бетонов, 2015, № 9-10. С. 21-24.
73. Patil S.N., Gupta A.K., Deshpande S.S. Metakaolin - pozzolanic material for cement in high strength concrete. IOSR Journal of mechanical and civil engineering (IOSR-JMCE), 2013, 2 (0), pp. 46-49.
74. Гелета О.Л., Кічняєв А.М., Ляшок В.І. Мінеральні ресурси України: глини. Частина 2. Характеристика глин, огляд їх запасів і галузей використання. Коштовне та декоративне каміння. 2011. № 4. С. 16-26.
75. Особенности гидратации и твердения цементных бетонов с добавками-модификаторами, содержащими метакаолин / А.А. Кирсанова, Ю.В. Ионов, А.А. Орлов, Л.Я. Крамар. Цемент и его применение. 2015, №2. С.130-135.
76. Красникова Н.М., Степанов С.В., Искандарова А.Ф. Исследование влияния метакаолина на прочность бетона. Международный научный журнал «Инновационная наука», 2015, №7, С.41-43.
77. Shah V., Parashar A., Mishra G., Medepalli S., Krishnan S., Bishnoi S. (2018). Influence of cement replacement by limestone calcined clay pozzolan on the engineering properties of mortar and concrete. Advances in Cement Research. 2020, Volume 32 Issue 3, pp. 101-111 doi:10.1680/jadcr.18.00073.
78. Кирсанова А.А., Крамар Л.Я., Рузавин А.А. Высокофункциональные тяжелые бетоны нормального твердения. Архитектура, градостроительство и дизайн, 2017, № 15. С.32-38.
79. Bogdanov R.R., Ibragimov R.A. Process of hydration and structure formation of the modified self-compacting concrete. Инженерно-строительный журнал. 2017. № 5 (73). С. 14-24.
80. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Ассоциация строительных ВУЗов, 2006. 368 с.
81. Химические и минеральные добавки в бетон. Под ред. А.В. Ушерова-

Маршака. Харьков: Колорит. 2005. 280 с.

82. Дворкін Л.Й., Марчук В.В., Яковчук В.В. Проектування складів дорожніх бетонів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2016, №32, С. 61-67.

83. Шевчук Г.Я., Топилко Н.І., Новицький Ю.Л., Гнип О.П. Особливості використання комплексних добавок на основі полікарбонатів в технології дорожніх бетонів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, № 66, С.123-128.

84. Ширинзаде И.Н., Ахмедов Н.М. Пути повышения эффективности фибробетона. Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 3-4 (57). С. 107-110.

85. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог / Л.Я. Крамар, А.И. Кудяков, Б.Я. Трофимов, К.В. Шулдяков. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017, №4, С.147-157.

86. Солодкий С.Й., Гуняк О.М., Марків Т.Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016, Вип. 98. С. 247-255.

87. Крамар Л.Я., Кудяков А.И., Трофимов Б.Я., Шулдяков К.В. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017, №4, С. 147-157.

88. Опыт внедрения мелкозернистых бетонов при производстве дорожных плит / Н.М. Красиникова, Н.М. Морозов, И.В. Боровских, В.Г. Хозин. Инженерно-строительный журнал, 2014, №7 С.46-54.

89. Горохова М.Н., Бышов Д.Н., Макеев Р.Н. Модификация литых бетонных смесей. Новые технологии в науке, образовании, производстве. Рязань: РИБиУ, 2014. С.401-410.

90. Комплексный модификатор с метакаолином для получения цементных композитов с высокой ранней прочностью и стабильностью / А.А. Кирсанова,

Л.Я. Крамар, Т.Н. Черных, Т.М. Аргынбаев, З.В. Стафеева. Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2013, том 13, № 1. С.49-56

91. Толмачев С. Н., Беличенко Е.А. Перспективы применения наночастиц в бетонах транспортного назначения. Строительные материалы и изделия, 2017, №1-2, С.38-41.

92. Вплив добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння на кінетику набору міцності цементним каменем. А.А. Плугін, О.В. Романенко, О.А. Калінін та ін. Вісник національного технічного університету "ХПІ". Харків :НТУ "ХПІ". 2015. № 21 (1130). С. 14-22.

93. Чан Туан Ми, Коровяков В.Ф. Самоуплотняющиеся бетонные смеси для дорожного строительства. Вестник МГСУ, 2012. № 3. С. 131-137.

94. Мишутин А.В., Солоненко И.П., Леонова А.В. Жесткие дорожные покрытия из цементобетона для автомобильных дорог. Дорогі і мости. К., 2018. Вип. 18. С. 119-127.

95. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Издательство АСВ, 2004. 560 с.

96. Большаков В.И., Деревянко В.Н. Дисперсно-армированные покрытия строительных конструкций и технологического оборудования. – Днепропетровск: Gaudeamus, 2001. 231 с.

97. Johnston C.D. Fiber-reinforced cements and concretes. CRC Press. 2001. 372 p.

98. Maruchchak U., Sanytsky M., Korolko S., Shabatura Y., Sydor N. Development of nanomodified rapid hardening fiber-reinforced concretes for special-purpose facilities. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018, № 2/6 (92). – pp. 34-41.

99. Застосування сталевібробетону в дорожньому будівництві. Є.М. Бабич, О.В. Андрійчук, С.О. Ужегов, І.В. Шаповал. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2015. Вип. 4. С. 3-9

100. Avishreshth S., Bansal P.P., Chopra T. Characterization of steel fiber reinforced pervious concrete for applications in low volume traffic roads. *Urbanization Challenges in Emerging Economies: Resilience and Sustainability of Infrastructure*, 2018, pp.93-102.

101. Liu H., Wang N. Computer model and analysis on pavement performance and pavement structure of polypropylene fibre material concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, Volume 1578, Issue 1, No. 012057.

102. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М., Стройиздат, 1981. 464 с.

103. Sliwinski J., Zych T. Contact zone between cement paste and fibre and its influence on the water permeability of fibre reinforced concrete. *Proc. int. symp. «Brittle Matrix Composites 5»*, BIGRAF and Woodhead Publ., Warsaw, 1997. P. 54-63.

104. Smirnova O., Kharitonov A., Belentsov Y. Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete. *Journal of traffic and transportation engineering (English Edition)*. 2019, Volume 6, Issue 4, pp. 407-417.

105. Karmacharya A., Gamarra J., Chao SH. Use of ultra-high-performance Fiber-reinforced concrete (UHP-FRC) for fast and sustainable repair of rigid pavements. *Airfield and Highway Pavements 2019: Design, Construction, Condition Evaluation, and Management of Pavements*, 2019. pp. 273-285.

106. Elsaigh W.A., Kearsley E.P., Robberts J.M. Steel fibre reinforced concrete for road pavement applications. 24th annual Southern African transport conference, SATC 2005: Transport Challenges for 2010. 2005, pp. 191-20

107. 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, Volume 13, e00429.

108. Иванов И.А., Бузаева М.М. Комбинированная дорожная плита с использованием фибробетона. *Вестник ВСГУТУ*, 2016, №4. С.12-18.

109. Benmokrane B., Bakouregui A.S., Hamdy M., Thebeau D., Abdelkarim O. Design, construction, and performance of continuously reinforced concrete pavement reinforced with GFRP bars: case study. *Journal of Composites for Construction*. 2020, Volume 24 Issue 5, 05020004

110. Rashid M.U. Experimental investigation on durability characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action. *Construction and Building Materials*, 2020, Volume 250, 118910

111. Ерёмина Н.Е., Пустовгар А.П., Абрамова А.Ю. Эффективность использования дисперсного армирования бетонов и строительных растворов полипропиленовой и базальтовой фиброй. *Технологии бетонов*, 2019, №7-8. С.34-42.

112. Ключев А.В. Фибробетон для покрытий автомобильных дорог. Научно-практический электронный журнал Аллея Науки, 2017, №16 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: https://alley-science.ru/domains_data/files/3December/FIBROBETON%20DLYa%20POKRYTIY%20AVTOMOBILNYH%20DOROG.pdf. Дата звернения – 09.01.2021

113. Ключев А.В., Дураченко А.В. Фибробетоны для ремонта дорожных покрытий на основе стеклянной фибры. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 1-2. С. 207-210.

114. Левкович Т.И., Мевлидинов З.А., Федин Н.А. Применение фибробетонной смеси при строительстве оснований и покрытий автомобильных дорог. *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*, 2019 №3, [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <https://t-s.today/PDF/01SAT319.pdf>. Дата звернения 22.11.2020.

115. Физико-механические свойства базальто-волокнутого высокопрочного бетона/ М. Харун, Д.Д. Коротеев, П. Дхар, С. Ждеро, Ш.М. Елроба. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018, №14 (5). С.396-403.

116. Adesina A., Bastani A., Heydariha J.Z., Das S., Lawn D. Performance of basalt fibre-reinforced concrete for pavement and flooring applications. *Innovative infrastructure solutions*. 2020, Volume 5, Issue 3, No. 103.

117. Кудряков А.И., Симакова А.С. Дорожные цементные бетоны с глиоксальсодержащими добавками. Повышение качества и эффективности строительных и специальных материалов. Сб. научно-технической конференции. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2019. С.152-156.

118. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А., Захаров Д.С. Повышение свойств дорожных бетонов введением полипропиленовой фибры. *Строительные материалы и изделия*. 2016, № 1. С.76-79.

119. Gupt R., Dulawat S. Effect of polypropylene fiber for cement concrete based on rigid pavement. *Journal of Xidian university*, 2020, Volume 14, Issue 4, pp. 2339-2346. <https://doi.org/10.37896/jxu14.4/259>

120. Ключев С.В., Авилова Е.Н. Мелкозернистый фибробетон с использованием полипропиленового волокна для покрытия автомобильных дорог. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2013, №1. С.37-40.

121. Ali B., Qureshi L.A., Kurda R. Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement. *Composites Communications*. 2020. Volume 22, No. 100437.

122. Varunkrishna N., Jayasankar R. Deflection control in rigid pavements. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 80, 012061

123. Kabashi N., Krasniqi C., Hadri R., Sadikaj A. Effect of fibre reinforced concrete and behaviour in rigid pavement. *International journal of structural and civil engineering research*, 2018, Vol. 7, No. 1. pp. 29-33.

124. Pansuriya A.N., Shinkar P.A. Use of polypropylene fiber in rigid pavement. *International journal of advance engineering and research development*. 2016, Volume 3, Issue 5. pp.178-184.

125. Мішутін А.В., Кривяков С.О., Полторапавлов А.О. Порівняння властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів на різних типах

заповнювача. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Випуск 31. Рівне: НУВГП, 2015. С.251-257.

126. Исследование возможности объемного армирования цементогрунтов для дорожного строительства / Санников С.П., Замятин А.В., Жигайлов А.А., Волков В.В. Транспортное строительство, 2019, № 1. С.13-14.

127. Исследование эффективности новых строительных материалов в дорожных конструкциях / Н.С. Самофеев, З.А. Гареева, Р.А. Мусин и др. Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2019, №2 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <https://resources.today/PDF/14ECOR219.pdf> Дата звернення – 22.01.2021.

128. Shen H.R., She Y.X., Gao P.W. The influence of polypropylene fiber on the performance of concrete pavement. Applied Mechanics and Materials, 2012. Volumes 178-181, pp. 1099-1103. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.178-181.1099

129. Nayar S.K., Gettu R. Mechanistic-empirical design of fibre reinforced concrete (FRC) pavements using inelastic analysis. Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences. 2020, Volume 45, Issue 1, No. 19

130. Онищенко А.М., Чиженко Н.П. Оцінка довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. Дороги і мости. К., 2020. Вип. 22. С. 138-148.

131. Дробишинець С.Я., Киричук М.В. Перспективи використання сталевібробетону в дорожньому будівництві. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2017, випуск 6. С.90-98.

132. Дослідження тріщиностійкості важких бетонів та пінобетонів, армованих поліпропіленовою фіброю для дорожнього будівництва / С.Й. Солодкий, В.О. Каганов, І.Б. Горніковська, Ю.В. Турба. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 4(5). С. 40-46.

133. Солодкий С.Й., Турба Ю.В. Тріщиностійкість бетонів з малим вмістом фібри. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2012. №742: Теорія і практика будівництва. С. 197-202.

134. Markovic I. High-performance hybrid-fibre concrete: development and utilisation. Delft: IOS press, 2006. 212 p.
135. Кровяков С.А., Мишутин А.В. Исследование трещиностойкости фибробетона с использованием полностью равновесных диаграмм деформации. Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 59. Книга 1. Київ: НДІБК, 2003. С. 288-293.
136. Choi S.Y. Park J.S. Jung W.T. A study on the shrinkage control of fiber reinforced concrete pavement. Procedia Engineering, 2011, Volume 14, pp. 2815-2822. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.354>
137. Штарк И., Вихт Б.. Долговечность бетона. Пер. с немец. Под ред. П. Кривенко. К.: Оранта, 2004. 301 с.
138. Дорошенко О.Ю., Дорошенко Ю.М. Досвід застосування фібробетону у будівництві. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія Транспортні системи і технології. 2014. Вип. 24. С. 5-10.
139. Методика оцінювання довговічності цементобетонного дорожнього покриття з урахуванням спільного впливу змін температури та дії транспорту. М 42.1-37641918-780:2020. Державне агентство автомобільних доріг України. Національний транспортний університет. К. 2020, 44 с.
140. Офіційний сайт компанії Coral [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://coral.ua>. Дата звернення 13.02.2020
141. ASTM Card File (Diffraction Date Card and Alphabetscal and Grouped Numerical Index of X-Ray Diffraction Date) –Philadelphia; Ed.By ASTM, 1969.
142. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. Одесса: ТЕС, 2010. 176 с.
143. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К.: Вища школа, 1989. 327 с.

144. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. 2-ое изд. М.: Финансы и статистика, 1981. 263 с.
145. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.
146. Jeff Wu C. F., Hamada M.S. Experiments: Planning, Analysis, and Optimization. 2d ed., Wiley & Sons, 2009. 552 p.
147. Использование COMPEX-99 при моделировании параметров кривых пластической прочности цементно-полимерных композиций с фиброй Куралон / Вознесенский В.А., Довгань П.М., Ляшенко Т.В. и др. Наук. вісник буд-ва: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. Вип.8. Харків, 1999. С.21-28.
148. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2006. 116 с.
149. Таблицы планов эксперимента. Для факторных и полиномиальных моделей. Справочное издание. / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова и др. Под ред. В.В. Налимова. М.: Металлургия, 1982. 753 с.
150. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Київ: Міністерство інфраструктури України, 2016. 70 с.
151. Mobasher V. Mechanics of fiber and textile reinforced cement composite. New York: CRC Press, 2011. 452 p.
152. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Фиц С.Б. Бетон в условиях ударных воздействий. Одесса: Внешрекламсервис, 2004. 270 с.
153. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Оценка влияния состава бетона жесткого дорожного покрытия на его прочность с учетом изменения Ц/В смеси. Моделирование и оптимизация композитов. Материалы к международному семинару, посвященному 80-тилетию В.А. Вознесенского. Одесса: Астропринт, 2014. С. 99-101.

154. Вознесенский В.А., Ковальчук А.Ф. Принятие решений по статистическим моделям. М.: Статистика, 1978. 196 с.

155. Мишутин А.В., Кровяков С.А. Оценка влияния состава модифицированного бетона на его прочность, водонепроницаемость и морозостойкость с учетом изменения Ц/В смеси. Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. №71 (94). Луганськ: ЛАНУ, 2007. С. 348-356.

156. Вознесенский В.А., Кровяков С.А., Ляшенко Т.В. Элементы компьютерного материаловедения при исследовании бетонов. Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 50. К.: НДІБК, 1999, С. 310-318.

157. Мішутін А.В., Кінтя Л. Міцність фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у різному віці. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2019, №77, С. 135-141. doi:10.31650/2415-377X-2019-77-135-141

158. Мішутін А.В., Кінтя Л. Дослідження модифікованих фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез доповідей III міжнародної конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд». Одеса: ОДАБА, 2019, С. 106.

159. Мішутін А.В., Кінтя Л., Кровяков С.О. Вплив складу бетону жорсткого дорожнього покриття на його ранню міцність. Матеріали міжнародного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів», Одеса: ОДАБА, 2019. С.118-120

160. Мішутін А.В., Кінтя Л. Фібробетони жорстких дорожніх покриттів з підвищеною ранньою міцністю. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво». Одеса: ОДАБА, 2020, С.63-65

161. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Кінтя Л. Врахування зміни Ц/В при оцінці впливу складу модифікованих бетонів жорстких дорожніх покриттів на їх міцність. Збірник тез доповідей міжнародного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів». Одеса: ОДАБА, 2020, С.86-90.

162. Добролюбов Г., Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. М.: Стройиздат, 1983. 212 с.
163. Пауэрс Т.К. Физические свойства цементного теста и камня. 4-й международный конгресс по химии цемента. М. Стройиздат, 1964. С. 174-189.
164. Подвальный А.М. Механизм морозного разрушения бетонных и железобетонных конструкций. Бетон и железобетон – пути развития. Том 3. Технология бетона. Сборник трудов 2 всероссийской конференции. М. 2005. С.171-177.
165. Взаимосвязь истираемости и морозостойкости дорожных бетонов / С.Н. Толмачев, И.Г. Кондратьева, А.Н. Чугуенко, Р.О. Гринченко. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2005, №30, С. 52-55.
166. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. Одесса: Город мастеров, 1998. 168 с.
167. Соломатов В.И., Выровой В.Н. Аббасханов Н.А. Бетон как композиционный материал. Ташкент: УзНИИНТИ, 1984. 31 с.
168. Mishutin A.V., Chintea L. The effect of modified additives on strength and frost resistance in fibrous concrete of rigid road pavements. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2020, №80, С. 64-74.
169. Mishutin A.V., Zavoloka M.V., Chintia L. Management of cement-concrete road pavement structure. Journal of Engineering Science Vol. XXVI, no. 1 (2019), pp. 91-95. doi:10.5281/zenodo.2649980
170. Mishutin A., Kos Z., Grynyova I., Chintea L. Durability of modified fiber concrete for rigid pavements. Croatian regional development journal, 2021, Vol. 2, No. 1, pp.35-46.
171. Мішутін А.В., Кінтя Л. Міцність і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез доповідей 76-ї конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2020, С.233

172. Мішутін А.В., Кінтя Л. Фібробетони жорстких дорожніх покриттів з високою довговічністю та ранньою міцністю. Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» Одеса: ОДАБА, 2021, С.61-64.

173. Мішутін А.В., Кінтя Л. Бетони і фібробетони жорстких дорожніх покриттів з підвищеною міцністю і довговічністю. Збірник тез доповідей III всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси». Одеса: ОДАБА, 2020, С.164.

**Список публікацій здобувача за темою дисертації
та відомості про апробацію результатів дисертації**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Мішутін А.В., Кінтя Л. Міцність фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у різному віці. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2019, №77, С. 135-141. doi:10.31650/2415-377X-2019-77-135-141

2. Mishutin A.V., Chintea L. The effect of modified additives on strength and frost resistance in fibrous concrete of rigid road pavements. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2020, №80, С. 64-74. doi:10.31650/2415-377X-2020-80-68-74

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

3. Mishutin A.V., Zavoloka M.V., Chintia L. Management of cement-concrete road pavement structure. Journal of Engineering Science Vol. XXVI, no. 1 (2019), pp. 91-95. doi:10.5281/zenodo.2649980

4. Mishutin A., Kos Z., Grynyova I., Chintea L. Durability of modified fiber concrete for rigid pavements. Croatian regional development journal, 2021, Vol. 2, No. 1, pp.35-46, ISSN 2718-4978 https://www.crdj.eu/wp-content/uploads/2021/03/03_CRDJ_vol2_no1_2021_pp_35-46.pdf

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Мішутін А.В., Кінтя Л. Дослідження модифікованих фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез доповідей III міжнародної

конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд». Одеса: ОДАБА, 2019, С. 106.

6. Мішутін А.В., Кінтя Л., Кровяков С.О. Вплив складу бетону жорсткого дорожнього покриття на його ранню міцність. Матеріали міжнародного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів», Одеса: ОДАБА, 2019. С.118-120

7. Мішутін А.В., Кінтя Л. Фібробетони жорстких дорожніх покриттів з підвищеною ранньою міцністю. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво». Одеса: ОДАБА, 2020, С.63-65

8. Мішутін А.В., Кінтя Л. Міцність і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез доповідей 76-ї конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2020, С.233

9. Кровяков С.О., Мішутін А.В., Кінтя Л. Врахування зміни Ц/В при оцінці впливу складу модифікованих бетонів жорстких дорожніх покриттів на їх міцність. Матеріали міжнародного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів». Одеса: ОДАБА, 2020, С.86-90.

10. Мішутін А.В., Кінтя Л. Бетони і фібробетони жорстких дорожніх покриттів з підвищеною міцністю і довговічністю. Збірник тез доповідей III всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси». Одеса: ОДАБА, 2020, С.164.

11. Мішутін А.В., Кінтя Л. Фібробетони жорстких дорожніх покриттів з високою довговічністю та ранньою міцністю. Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» Одеса: ОДАБА, 2021, С.61-64.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

- 3-я міжнародна науково-практична конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (Україна, м. Одеса, 26-26 вересня 2019 р. – очна участь);
- міжнародний семінар «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (Україна, м. Одеса, 21-22 листопада 2019 р. – заочна участь);
- 76-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 25-29 травня 2020 р. – очна участь);
- науково-технічна конференція «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (Україна, м. Одеса, 23 вересня 2020 р. – очна участь);
- міжнародний науковий семінар «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (Україна, м. Одеса, 03-04 грудня 2020 р. – очна участь).
- 3-я всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси» (Україна, м. Одеса, 17-18 грудня 2020 р. – очна участь).

Додаток Б.

**Титульні сторінки «Регламенту з технології приготування і застосування
модифікованого бетону для покриттів автодоріг із застосуванням
поліпропіленової фібри»**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**
Начальник ДП «Облавтодор»
ВАТ ДАК «Автомобільні дороги України»
Єгіазарян А.В.
« 15 » 12 2020 р.

РЕГЛАМЕНТ

з технології приготування і застосування модифікованого бетону
для покриттів автодоріг із застосуванням поліпропіленової фібри

Розроблений в Одеській державній академії будівництва та архітектури.

Ректор академії – проф. Ковров А.В.

Розробники - д.т.н. проф. Мішутіна А.В., завідувач кафедри автомобільних доріг та аеродромів;

- к.т.н., проф. Заволока М.В., завідувач кафедри виробництва будівельних виробів та конструкцій, керівник атестованої науково-дослідної лабораторії випробувань будівельних матеріалів;

- Кінтя Л., аспірантка кафедри автомобільних доріг та аеродромів (відповідальний виконавець).

Додаток В.

**Довідка про впровадження результатів наукових досліджень
в навчальний процес**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, тел./факс: (048) 723-69-04, тел. (048) 723-43-53,
E-mail: list@ogasa.org.ua, веб-сайт: www.odaba.edu.ua, код ЄДРПОУ 02071033

08.02.2021

№ 29-102

Г

Г

На № _____ від _____

Довідка

про впровадження результатів наукових досліджень

Ця довідка засвідчує, що результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі Лючії Кінтії на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, за темою «Бетони підвищеної довговічності для жорстких покриттів автомобільних доріг» (науковий керівник – д.т.н., проф. А.В. Мішутін), впроваджені в навчальний процес в Одеській академії будівництва та архітектури.

Результати досліджень використовуються при підготовці дипломних робіт магістрів, а також у курсах лекцій освітніх компонентів «Наукові основи довговічності автомобільних доріг та аеродромів» і «Будівництво та експлуатація автомобільних доріг» освітньо-професійної програми «Автомобільні дороги і аеродроми та транспортні системи» підготовки магістрів спеціальність 192 - Будівництво та цивільна інженерія.

Проректор з НПР, д.т.н., проф.

Ю. Крутій