

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Шестакова Любов Євгенівна

УДК 691.32

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МОДИФІКОВАНІ ФІБРОБЕТОНИ З БАЗАЛЬТОВОЮ ФІБРОЮ**  
**ДЛЯ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ**

**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

\_\_\_\_\_ Шестакова Л.Є.

*Науковий керівник:*

Кровяков Сергій Олексійович, доктор технічних наук, професор

Одеса – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Шестакова Л.Є.* Модифіковані фібробетони з базальтовою фіброю для жорстких дорожніх покриттів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Одеська державна академія будівництва та архітектури – Одеса, 2024.

*Метою роботи* є розробка модифікованих фібробетонів для жорстких дорожніх покриттів з необхідної для доріг відповідної категорії міцністю та підвищеною довговічністю за рахунок використання раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатора полікарбосилатного типу.

*У вступі* обґрунтовано вибір теми дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету роботи і завдання досліджень, описано методи досліджень, наведені положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів.

*У першому розділі* проаналізовано особливості складу і властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів і досвід експлуатації доріг з жорсткими покриттями.

У розвинутих країнах об'єми будівництва дорожніх покриттів жорсткого типу поступово зростають. Цементобетонні покриття характеризуються стійкістю до утворення колій і хвиль, високою рівністю і низькою залежністю властивостей від температури навколишнього середовища. Завдяки високій довговічності жорсткі покриття дозволяють зменшити витрати на утримання доріг.

Показано, що ефективним прийомом підвищення міцності на розтяг при згині, як основної характеристики дорожніх бетонів, а також морозостійкості та зносостійкості бетону, є дисперсне армування, зокрема стійкою до корозії базальтовою фіброю. Це додатково сприяє можливості зниженню товщини дорожньої плити, що підвищує економічну ефективність жорстких покриттів. Для забезпечення необхідної легкоукладальності фібробетонів і зниження В/Ц

слід використовувати сучасні полікарбосилатні суперпластифікатори. Кількість втягнутого повітря при приготуванні фібробетонів може суттєво змінюватися в залежності від сировинних матеріалів, факторів навколишнього середовища і технології виробництва. Ефективним прийомом регулювання цього показника є використання повітровтягуючих добавок.

За результатами проведеного аналізу сформульовано *робочу гіпотезу* роботи про доцільність використання базальтової фібри у комбінації з добавкою суперпластифікатором полікарбосилатного типу для впливу на структуру бетону, який забезпечить підвищення показників міцності та довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів. Довговічність бетонів дорожніх одягів обумовлюється насамперед їх високою морозостійкістю і низькою стираністю. Окремо доцільно визначити вплив на структуру та ефективність повітровтягуючої добавки при її використанні в модифікованих фібробетонах дорожніх покриттів.

У *другому розділі* наведена загальна схема проведення досліджень, описана методика їх проведення і характеристика використаних матеріалів.

Для виготовлення бетонів і фібробетонів використовувалися: портландцемент ПЦ І-500 Р-Н, гранітний щебінь фракції 5-20 мм, кварцовий пісок, добавка суперпластифікатор STACHEMENT 2570/5/G, повітровтягуюча добавка MICROPORAN, базальтова фібра BAUCON®-bazalt з довжиною волокон 12 мм і діаметр 18 мкм.

У *третьому розділі* наведено результати першого етапу роботи, в рамках якого було проведено дослідження впливу базальтової фібри і повітровтягуючої добавки властивості і структуру бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Було досліджено властивості 12 складів бетонів, які були поділені на 3 серії. У кожній серії виготовлялися 4 склади з різною кількістю дисперсної арматури: без фібри, а також з фіброю у кількості 0,50, 0,75 і 1,0 кг/м<sup>3</sup>. В першій серії виготовлялися склади без повітровтягуючої добавки. В другій серії виготовлялися бетони і фібробетони з повітровтягуючою добавкою у кількості 0,05% від маси цементу, у третій – з повітровтягуючою добавкою у кількості

0,15% від маси цементу. У всі бетонні суміші вводився суперпластифікатор у кількості 0,6% від маси цементу.

Встановлено, що при використанні дисперсного армування базальтовою фіброю В/Ц сумішей підвищується несуттєво. Бетонні та фібробетонні суміші, до яких вводилася добавка MICROPORAN, характеризувалися на 3,6-4.1% нижчим В/Ц.

При застосуванні повітровтягуючої добавки середня густина досліджених бетонів і фібробетонів зменшується на 1,9-5,4%. За рахунок зменшення середньої густини міцність на стиск бетонів знижується на 2-21%, також на 2-7% підвищується їх стиранисть (знижується зносостійкість). При цьому кількості повітровтягуючої добавки майже не впливає на міцність бетонів на розтяг при згині. При використанні повітровтягуючої добавки у кількості 0,05% від маси цементу морозостійкість бетонів і фібробетонів не змінюється, при використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,15% для бетону без дисперсного армування марка за морозостійкістю підвищується з F200 до F300. Тобто застосування повітровтягуючої добавки для досліджених бетонів і фібробетонів має обмежену ефективність.

Натомість дисперсне армування оказує комплексний позитивний вплив на міцність і довговічність бетону жорсткого дорожнього покриття. При використанні фібри BAUCON®-bazalt у кількості 0,75-1 кг/м<sup>3</sup> міцність бетону на стиск підвищується на 13-24%, міцність на розтяг при згині – на 21-29%, морозостійкість підвищується на рівень до 100 циклів. Також дисперсне армування на 14-15% знижує стиранисть бетону.

Завдяки використанню дисперсного армування базальтовою фіброю а також модифікації суперпластифікатором STACHEMENT 2570/5/G отримано фібробетони жорстких дорожніх покриттів з міцністю на стиск до 63,2 МПа, міцністю на розтяг при згині до 7,66 МПа та підвищеною довговічністю.

У *четвертому розділі* наведено результати другого етапу досліджень, який розширює діапазон використання отриманих результатів першого етапу досліджень для влаштування жорстких покриттів доріг різних категорій. Даний

етап виявляє вплив кількості суперпластифікатору і фібри на властивості бетонів з різною кількістю цементу.

Використовувалися методи оптимального планування експерименту і експериментально-статистичного моделювання. За 15-ти точковим оптимальним планом проведено експеримент, в якому варіювалися наступні фактори складу: кількість портландцементу (від 290 до 350 кг/м<sup>3</sup>), кількість базальтової фібри BAUCON®-bazalt з довжиною волокон 12 мм і діаметром 18 мкм (від 0,9 до 1,5 кг/м<sup>3</sup>), кількість суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G (від 0,6 до 1% від маси цементу).

Всі суміші мали рівну рухомість з ОК=2..3 см. Встановлено, що найменше В/Ц сумішей рівної рухомості досягається при введенні суперпластифікатору у кількості 0,8-0,9% від маси цементу. При зміні кількості базальтової фібри від 0,9 до 1,5 кг/м<sup>3</sup> В/Ц суміші практично не змінюється.

За рахунок підвищення кількості портландцементу міцність фібробетонів на стиск очікувано зростає, при цьому у проектному віці більш відчутно, ніж у віці 3 діб. Підвищення дозування суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9-1% викликає зниження В/Ц, за рахунок чого міцність на стиск фібробетонів зростає у віці 3 діб на 2,3-2,6 МПа, у віці 28 діб – на 3,2-3,8 МПа.

На рівень міцності на розтяг при згині фібробетонів найбільш суттєво впливає кількість цементу. За рахунок збільшення кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м<sup>3</sup> міцність на розтяг при згині у віці 3 діб зростає на 0,5-0,6 МПа, у віці 28 діб – на 0,7-0,8 МПа. Зміна кількості суперпластифікатору в межах факторного простору експерименту несуттєво впливає на міцність фібробетонів на розтяг при згині.

При збільшенні кількості цементу з 290 до 350 кг/м<sup>3</sup> морозостійкість фібробетонів зростає на рівень до 100 циклів. При цьому за рахунок підвищення міцності також знижується стираність бетону, тобто зростає його зносостійкість. При підвищенні кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м<sup>3</sup> стираність бетонів знижується на 11-16%, а морозостійкість зростає

приблизно на 50 циклів. Зміна кількості суперпластифікатору несуттєво впливає на зносостійкість бетону. При цьому при підвищенні кількості добавки STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9% від маси цементу морозостійкість фібробетонів зростає на рівень до 50 циклів.

Завдяки застосуванню раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатору отримано фібробетони з міцністю на стиск від 40 до 55 МПа, міцністю на розтяг при згині від 4,5 до 6 МПа, морозостійкістю від F200 до F300 і стираністю від 0,31 до 0,38 г/см<sup>2</sup> в залежності від кількості цементу в складі.

З використанням комплексу отриманих експериментально-статистичних моделей та методу багатокритеріальної оптимізації обрано оптимальні склади фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг Ia, Ib і II/III категорій. Обрані склади мають найменшу собівартість при забезпеченій необхідній міцності для відповідної категорії дороги та підвищену довговічність.

Завершальний третій етап досліджень був присвячений впровадженню результатів у навчальний процес та виробництво, зокрема отриманих раціональних складів фібробетонів.

Результати проведених досліджень були використані Дочірнім підприємством «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»». Рекомендовані склади фібробетонів з базальтовою фіброю використовувалися при влаштуванні жорсткого дорожнього покриття в процесі капітального ремонту автомобільної дороги загального користування державного значення Р-04 Київ – Фастів – Біла Церква – Звенигородка, км 212+220 – км 223+070, Звенигородського району Черкаської області.

Результати також були впроваджені в навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів спеціальність 192 - Будівництво та цивільна інженерія за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми».

**Ключові слова:** цементобетонні покриття, жорсткий дорожній одяг, базальтова фібра, суперпластифікатор, повітровтягуюча добавка, міцність, довговічність, морозостійкість, стиранисть.

## ABSTRACT

*Shestakova L.E.* Modified fiber concrete with basalt fiber for rigid pavements

PhD thesis. Specialty 192 – Construction and civil engineering – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odesa, 2024.

*The goal of the work* is the development of modified fiber concrete for rigid pavements with required strength and increased durability due to the use of a rational amount of basalt fiber and superplasticizer of the polycarboxylate type.

*The introduction* substantiates the choice of the research topic, shows the connection of the work with scientific programs, plans and topics, formulates the purpose of the work and research tasks, describes the research methods, states the scientific novelty and practical significance of the obtained results.

*The first* chapter analyzes the features of the composition, properties of rigid pavement concretes and the experience of operating roads with rigid pavements.

In developed countries, the volume of construction of rigid pavements is gradually increasing. Cement concrete coatings are characterized by resistance to the formation of ruts and waves, high uniformity and low dependence of properties on ambient temperature. Due to their high durability, rigid pavements allow to reduce road maintenance costs.

It is shown that an effective method of increasing of the flexural strength in bending, as the main characteristic of road concrete, as well as frost resistance and wear resistance of concrete, is dispersed reinforcement, in particular with corrosion-resistant basalt fiber. This additionally contributes to the possibility of reducing the thickness of the road slab, which increases the economic efficiency of rigid coatings. Modern polycarboxylate superplasticizers should be used to ensure the required workability of fiber concrete and to reduce W/C. The amount of entrained air during the preparation of fiber concrete can vary significantly depending on the raw materials, environmental factors and production technology. An effective method of regulating this indicator is the use of air entraining additives.



Based on the results of the analysis, a working hypothesis was formulated about the feasibility of using basalt fiber in combination with a polycarboxylate-type superplasticizer additive to influence on the structure of concrete, which will ensure an increase in the strength and durability of concrete for rigid pavements. The durability of concrete pavements is determined primarily by their high frost resistance and low abrasion resistance. Separately, it is expedient to determine the effect on the structure and efficiency of the air-entraining additive when it is used in modified fiber concrete pavements.

In *the second section*, the general scheme of conducting research, the methodology of research and the characteristics of the used materials are described.

For the production of concrete and fiber concrete, the following materials were used: Portland cement CEM I 42,5 R, granite crushed stone of fraction 5-20 mm, quartz sand, superplasticizer additive STACHEMENT 2570/5/G, air-entraining additive MICROPORAN, basalt fiber BAUCON®-basalt with a fiber length of 12 mm and a diameter of 18  $\mu\text{m}$ .

*The third section* presents the results of the first stage of work, which included a study of the influence of basalt fiber and air-entraining additive on the properties and structure of concrete and fiber-reinforced for rigid pavements. The properties of 12 concrete compositions, which were divided into 3 series, were investigated. In each series, 4 compounds were produced with different amounts of dispersed reinforcement: without fiber, as well as with fiber in the amount of 0.50, 0.75 and 1.0  $\text{kg/m}^3$ . In the first series, compounds were produced without an air-entraining additive. In the second series, concrete and fiber concrete with an air-entraining additive in the amount of 0.05 % of the cement mass were produced, in the third series – with an air-entraining additive in the amount of 0.15 % of the cement mass. A superplasticizer in the amount of 0.6 % of the cement mass was introduced into all concrete mixes.

It was found that when using dispersed reinforcement with basalt fiber, the W/C of the mixtures increases insignificantly. Concrete and fiber concrete mixtures to

which the MICROPORAN additive was added were characterized by 3.6-4.1 % lower W/C.

When using an air-entraining additive, the average density of the studied concretes and fiber concretes decreases by 1.9-5.4 %. Due to the decrease in the average density, the compressive strength of concrete decreases by 2-21 %, and their abrasion resistance (wear resistance decreases) decreases by 2-7 %. At the same time, the amount of air-entraining additive has almost no influence on the flexural strength in bending of concrete. When using an air-entraining additive in the amount of 0.05 % of the mass of cement, the frost resistance of concrete and fiber concrete does not change, when using the MICROPORAN additive in the amount of 0.15 % for concrete without dispersed reinforcement, the brand for frost resistance increases from F200 to F300. That is, the use of an air-entraining additive for the tested concretes and fiber concretes has limited effectiveness.

Instead, dispersive reinforcement has a complex positive effect on the strength and durability of rigid pavements concrete. When using BAUCON®-basalt fiber in the amount of 0.75-1 kg/m<sup>3</sup>, the compressive strength of concrete increases by 13-24 %, the flexural strength in bending – by 21-29 %, frost resistance increases to the level of up to 100 cycles. Dispersed reinforcement also increases the abrasion resistance of concrete by 14-15 %.

Due to the use of dispersed reinforcement with basalt fiber and modification with superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G, fiber concretes of rigid pavements with compressive strength up to 63.2 MPa, flexural strength in bending up to 7.66 MPa and increased durability were obtained.

*The fourth section* presents the results of the second stage of research, which expands the range of use of the results of the first stage of research for the construction of rigid pavements of various categories. This stage reveals the influence of the amount of superplasticizer and fiber on the properties of concrete with different amounts of cement.

Methods of optimal planning of the experiment and experimental-statistical modeling were used. According to the 15-point optimal plan, an experiment was

conducted in which the following composition factors varied: the amount of Portland cement (from 290 to 350 kg/m<sup>3</sup>), the amount of basalt fiber BAUCON®-basalt with a fiber length of 12 mm and a diameter of 18 μm (from 0.9 up to 1.5 kg/m<sup>3</sup>), the amount of superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G (from 0.6 to 1 % of the cement mass).

All mixtures had equal workability with cone slump – 2..3 cm. It was established that the lowest W/C of mixtures with equal mobility is achieved with the introduction of superplasticizer in the amount of 0.8-0.9 % of the mass of cement. When the amount of basalt fiber changes from 0.9 to 1.5 kg/m<sup>3</sup>, the W/C of the mixture practically does not change.

Due to the increase in the amount of Portland cement, the compressive strength of fiber concrete is expected to increase, while at the design age it is more noticeable than at the age of 3 days. Increasing the dosage of superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G from 0.6 to 0.9-1 % causes a decrease in W/C, due to which the compressive strength of fiber concrete increases at the age of 3 days by 2.3-2.6 MPa, at the age 28 days – by 3.2-3.8 MPa.

The amount of cement has the most significant effect on the level of flexural strength of fiber concrete. Due to the increase in the amount of basalt fiber from 0.9 to 1.3-1.4 kg/m<sup>3</sup>, the flexural strength in bending at the age of 3 days increases by 0.5-0.6 MPa, at the age of 28 days – by 0.7-0.8 MPa. Changing the amount of superplasticizer within the factor space of the experiment does not significantly affect the flexural strength in bending of fiber concretes.

When the amount of cement is increased from 290 to 350 kg/m<sup>3</sup>, the frost resistance of fiber concrete increases to the level of up to 100 cycles. At the same time, due to the increase in strength, the abrasion resistance of concrete also increases, that is, its wear resistance increases. When increasing the amount of basalt fiber from 0.9 to 1.3-1.4 kg/m<sup>3</sup>, the abrasion resistance of concrete increases by 11-16 %, and the frost resistance increases by approximately 50 cycles. Changing the amount of superplasticizer does not significantly affect the abrasion resistance of concrete. At the same time, when the amount of STACHEMENT 2570/5/G additive

is increased from 0.6 to 0.9 % of the cement mass, the frost resistance of fiber concrete increases to the level of up to 50 cycles.

Thanks to the use of a rational amount of basalt fiber and a superplasticizer, fiber concretes with compressive strength from 40 to 55 MPa, flexural strength in bending from 4.5 to 6 MPa, frost resistance from F200 to F300 and abrasion resistance from 0.31 to 0.38 g/cm<sup>2</sup> were received, depending on the amount of cement in the composition.

With the use of a complex of obtained experimental and statistical models and the method of multi-criteria optimization, the optimal compositions of fiber concrete rigid pavements for roads of Ia, Ib and II/III categories were selected. The selected compositions have the lowest cost price while providing the necessary strength for the corresponding road category and increased durability.

The final third stage of research was devoted to the implementation of the results in the educational process and production, in particular, the obtained rational compositions of fiber concrete.

The results of the conducted research were used by the subsidiary "Cherkasky Oblavtodor" of JSC "Roads of Ukraine". The recommended compositions of fiber concrete with basalt fiber were used during the construction of a rigid pavement in the process of capital repair of the public road of state importance P-04 Kyiv – Fastiv – Bila Tserkva – Zvenigorodka, km 212+220 – km 223+070, Zvenigorod district of Cherkasy region.

The results were also implemented in the educational process of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture in the preparation of masters in specialty 192 – Construction and civil engineering under the educational program "Roads and Airfields".

**Key words:** cement-concrete pavements, rigid road wear, basalt fiber, superplasticizer, air-entraining additive, strength, durability, frost resistance, abrasion resistance.

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

#### *Статті у наукових фахових виданнях України*

1. Kroviakov S.O., Shestakova L.E. Durability of rigid pavement concrete reinforced with basalt fiber. *Сучасне будівництво та архітектура*, 2024, №7, С.109-117. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-7-109-117>

2. Кровяков С.О., Ігнатенко А. В., Шестакова Л.Є., Заволока М.В. Пошук оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття з використанням експериментально-статистичних моделей. *Механіка та математичні методи*, 2024. Т. VI. № 1. С. 6-16. <http://mmm-journal.com.ua/pages/archive.php>

3. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Вплив базальтової фібри і суперпластифікатору на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів. *Сучасне будівництво та архітектура*, 2023, №6, С.99-108. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-99-108>

4. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Міцність, зносостійкість і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю та повітровтягуючою добавкою. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 144–158. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.144>

#### *Статті у наукових періодичних виданнях інших держав*

5. Kroviakov S., Shestakova L. Influence of basalt fiber and air-entraining admixture on the properties of rigid concrete pavement. *Romanian Journal of Materials* 2023, 53 (2), pp. 170-175. <https://solacolu.chim.upb.ro/pg170-175.pdf>  
(Індексується наукометричними базами Scopus і Web of Science)

### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Вплив повітровтягуючої добавки та базальтової фібри на міцність і довговічність бетонів жорстких дорожніх

покриттів: матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Моделювання та оптимізація будівельних композитів». Одеса: ОДАБА, 2022, С. 62-66

7. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Вплив базальтової фібри і повітровтягувальної добавки на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів: збірка тез доповідей 78-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2022. С. 202

8. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Дослідження властивостей фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю і повітровтягувальною добавкою: збірка тез доповідей 77-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2021. С.171

## ЗМІСТ

Анотація .....	2
Вступ.....	17
Розділ 1 Склад, властивості та досвід експлуатації бетонів жорстких дорожніх покриттів.....	22
1.1 Цементобетонні дорожні покриття. Досвід будівництва і експлуатації .....	22
1.2 Вплив дисперсного армування на властивості бетонів жорстких дорожніх покриттів .....	28
1.3 Управління структурою і властивостями бетонів жорстких дорожніх одягів за рахунок використання модифікаторів .....	38
1.4 Робоча гіпотеза, мета і завдання роботи.....	44
Висновки до розділу 1 .....	46
Розділ 2 Методика проведення дослідження і характеристика використаних матеріалів .....	48
2.1 Загальна схема проведення досліджень .....	48
2.2 Методика досліджень фізико-механічних властивостей і структури фібробетонів транспортних споруд та дорожніх одягів.....	49
2.3 Характеристика використаних матеріалів.....	53
2.4 План експерименту другого етапу досліджень і варійовані в експерименті фактори.....	56
Висновки за 2-м розділом.....	59
Розділ 3 Властивості бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю і повітровтягуючою добавкою .....	60
3.1 Склади досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів .....	60
3.2 Властивості бетонних і фібробетонних сумішей.....	63
3.3 Середня густина та міцність бетонів і фібробетонів.....	66
3.4 Вплив дисперсного армування і повітровтягуючої добавки на стираність і морозостійкість бетонів .....	72

Висновки за 3-м розділом.....	78
Розділ 4 Властивості фібробетонів жорстких дорожніх покриттів .....	80
4.1 Вплив складу фібробетону на В/Ц сумішей рівної рухомості .....	80
4.2 Середня густина фібробетонів.....	84
4.3 Міцність на стиск досліджених фібробетонів у різному віці.....	87
4.4 Міцність фібробетонів на розтяг при згині у різному віці .....	92
4.5 Морозостійкість і зносостійкість досліджених фібробетонів .....	97
4.6 Рентгенофазовий аналіз цементуючої матриці та мікроскопічний аналіз мезоструктури бетонів.....	106
4.7 Вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів.....	111
4.8 Впровадження результатів досліджень .....	121
Висновки за 4-м розділом.....	122
Загальні висновки.....	125
Список використаних джерел .....	127
Додатки.....	149
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	149
Додаток Б. Акти впровадження результатів досліджень .....	152



## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** На сучасному етапі в Україні особливу увагу приділяють розвитку інфраструктури, зокрема будівництву доріг з використанням цементобетонного покриття чи обладнання жорстких шарів дорожнього одягу. Цей підхід стає надзвичайно актуальним та важливим у контексті покращення якості дорожнього покриття та забезпечення довговічності інфраструктурних об'єктів. Досвід будівництва та експлуатації доріг в Європейському союзі, США та інших розвинутих країнах показує, що використання цементобетону має свої переваги у порівнянні з іншими матеріалами. Зокрема це збільшена стійкість до утворення колій, хвиль та зношування, менша потреба в регулярному обслуговуванні та підвищена стійкість до впливу навколишнього середовища. Такі переваги роблять використання цементобетону не лише актуальним, але й стратегічно обґрунтованим рішенням для дорожнього будівництва. Використання модифікованих фібробетонів – це можливість покращення якості та довговічності дорожніх одягів і розширення спектру матеріалів для транспортних проєктів. Базальтова фібра має високу міцність та стійкість до корозії при порівняно низькій вартості, що робить її привабливим варіантом для покращення фізико-механічних властивостей фібробетонних конструкцій.

В кліматичних умовах України та більшості європейських країн основними показниками, що забезпечують довговічність жорстких дорожніх покриттів, є морозостійкість та зносостійкість бетонів. Досягнути одночасного підвищення цих показників можливо, зокрема, за рахунок використання ефективних суперпластифікаторів та дисперсного армування. Проте сировинна база бетонної промисловості не є сталою: змінюються технології виробництва цементу, вдосконалюються хімічні добавки, виробляються нові типи дисперсної арматури. Тому задача розробки бетонів жорстких дорожніх покриттів з високою довговічністю та забезпеченим рівнем міцності залишається актуальною.

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

**Метою роботи** є розробка модифікованих фібробетонів для жорстких дорожніх покриттів з необхідною для доріг відповідної категорії міцністю та підвищеною довговічністю за рахунок використання раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатора полікарбосилатного типу.

Для досягнення мети поставлені **завдання**:

- проаналізувати сумісний вплив базальтової фібри і повітровтягуючої добавки на технологічні властивості бетонних сумішей, структуру і властивості бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів;
- визначити вплив повітровтягуючої добавки на міцність, морозостійкість та зносостійкість бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів;
- із застосуванням методів планування експерименту дослідити вплив портландцементу, базальтової фібри і суперпластифікатору полікарбосилатного типу на рухомість бетонних сумішей та структуру і властивості фібробетонів жорстких дорожніх покриттів;
- визначити вплив кількості базальтової фібри і суперпластифікатору полікарбосилатного типу на ранню і проектну міцність, морозостійкість і зносостійкість фібробетонів дорожніх покриттів;
- визначити оптимальні склади фібробетонів жорстких дорожніх покриттів для доріг різних категорій, які мають найменшу собівартість при забезпеченій необхідній міцності та підвищеній довговічності.
- провести промислове впровадження отриманих результатів, а також впровадження у навчальний процес.

**Об'єкт досліджень.** Модифіковані бетони і фібробетони жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю.

**Предмет досліджень.** Закономірності впливу базальтової фібри, суперпластифікатору полікарбосилатного типу і повітровтягуючої добавки на структуру і властивості бетонів жорстких дорожніх покриттів.

**Методи досліджень.** Фізико-механічні характеристики модифікованих бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів визначалися відповідно до чинних нормативів на атестованому обладнанні. Застосовувався рентгенофазовий аналіз цементуючої матриці та мікроскопічний аналіз структури фібробетонів. Частина експериментальних досліджень виконана за оптимальним 3-х факторним планом. Побудова нелінійних експериментально-статистичних моделей виконувалася із застосуванням спеціалізованої системи COMPEX. Застосовувалися багатокритеріальний пошук оптимальних складів модифікованих бетонів за комплексом отриманих ЕС-моделей.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

- встановлено закономірності та ефективність впливу на властивості та структуру модифікованих бетонів для жорстких дорожніх покриттів суперпластифікатору полікарбосилатного типу, повітровтягуючої добавки та дисперсного армування базальтовою фіброю;

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість покращення фізико-механічних властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів (міцність на стиск і на розтяг при згині, морозостійкість, зносостійкість) за рахунок застосування раціональної кількості суперпластифікатору полікарбосилатного типу та базальтової фібри;

- з використанням методів експериментально-статистичного моделювання проведена багатокритеріальна оптимізація складів модифікованих фібробетонів з заданими показниками міцності, морозостійкості та зносостійкості, що забезпечує необхідну довговічність матеріалу;

- подальший розвиток отримало розроблення наукових засад проектування модифікованих фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з необхідною

міцністю та підвищеною довговічністю з врахуванням наявної сировинної бази і економічних аспектів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Із застосуванням комплексу ЕС-моделей визначені оптимальні за собівартістю склади фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з необхідною міцністю та довговічністю, яка забезпечується морозостійкістю та зносостійкістю бетону. Рекомендовані склади фібробетонів з базальтовою фіброю були використані дочірнім підприємством «Черкаський обласдор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»» при влаштуванні жорсткого дорожнього покриття автомобільної дороги Р-04 Київ – Фастів – Біла Церква – Звенигородка. 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».

**Особистий внесок здобувача** полягає у проведенні експериментальних досліджень структури і властивостей модифікованих бетонів і фібробетонів для жорстких дорожніх покриттів, обробці та узагальненні отриманих експериментальних результатів, виборі оптимальних складів фібробетонів та у впровадженні отриманих результатів у виробництво.

Всі основні результати досліджень були отримані автором дисертації самостійно. Формулювання гіпотези, мети та завдань дисертаційної роботи, планування експериментальних досліджень та загальний аналіз їх результатів виконані разом із науковим керівником. Особистий внесок автора в роботах, що надруковані в співавторстві, полягає в проведенні лабораторних досліджень структури і властивостей бетонних сумішей, бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів, а також в узагальненні результатів даних досліджень.

**Апробація дисертаційної роботи.** Основні результати досліджень доповідалися на: 77-й конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (м. Одеса, 2021 р.), 78-й конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної

академії будівництва та архітектури (м. Одеса, 2022 р.) міжнародної науково-технічної конференції «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (м. Одеса, 2022 р.), 79-й конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (м. Одеса, 2023 р.), V міжнародній науково-практичній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 2023 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковані у 8 наукових працях, з яких 4 статті у фахових виданнях України, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави (Індексується наукометричними базами Scopus і Web of Science), 3 тези доповідей у збірниках наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертацію викладено на 155 сторінках, у тому числі 109 сторінок основної частини, складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (194 найменування) та додатків на 6 сторінках, містить 32 рисунки і 22 таблиці.

# РОЗДІЛ 1

## СКЛАД, ВЛАСТИВОСТІ ТА ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ БЕТОНІВ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

### 1.1 Цементобетонні дорожні покриття. Досвід будівництва і експлуатації

Цементобетонні дорожні покриття здобули популярність в світі завдяки своїм перевагам у міцності, довговічності та низькими витратам на їх обслуговування. Термін служби покриттів такого типу складає від 20 до 25 років, що приблизно в 2-3 рази більше міжремонтного строку асфальтобетону [1]. Досвід будівництва і експлуатації жорстких дорожніх покриттів відображається в результативності, ефективності та великому об'ємі транспортних мереж з використанням цементобетону. Так, наприклад, у країнах ЄС та США частка жорстких дорожніх покриттів становить 35-65%, також у таких країнах як Китай та Японія збільшується тенденція з будівництва цементобетонних автомагістралей [2,3]. За останні десятиріччя європейськими країнами, Канадою та США була обрана стратегія розвитку будівництва екстра довговічних цементобетонних покриттів (long-life concrete pavements), строк служби яких повинен складати до 40 років [4,5].

Перше цементобетонне покриття у сучасному уявленні датується 1865 роком і було побудоване у м. Івернес, Шотландія. Деякі ділянки жорсткого покриття, побудованого в 1872 р. у м. Едінбург, Шотландія, експлуатується й у наші часи. Далі, з розвитком використання портландцементу у якості основного в'язучого для будівельних робіт, у 1891 р. було побудоване перше цементобетонне покриття в США. А 20 квітня 1909 р. у штаті Мічиган побудовано першу у світі милю з використанням технології цементобетонних покриттів [6]. Такі дані свідчать про ранню та швидку адаптацію цього матеріалу в дорожньому будівництві.

Із розвитком технологій та вдосконаленням процесів будівництва, використання цементобетону для дорожніх покриттів стало більш поширеним і

ефективним. Справжній прорив у використанні бетону для будівництва доріг стався в США. Перша дорога, прокладена виключно з бетону, була відкрита в 1914-1915 рр. у штаті Огайо [7]. Вона була довжиною всього 24 милі, а зараз є частиною автомагістралі U.S. Route 33. Географічний сусід США – Канада побудували першу ділянку з цементобетону у 1930 р. [8].

Згодом країни західної Європи також почали активно використовувати цементобетон для будівництва важливих транспортних ділянок. Так у проміжку з 1927 по 1933 рр. в Угорщині було побудовано близько 103 км доріг з жорстким покриттям [9]. Німеччина почала розширювати частку бетонних автострад у 1934 р. і вже до 1939 р. їх протяжність нараховувала 3500 км [5]. Паралельно йшло будівництво жорстких покриттів у Австрії, Бельгії, Нідерландах.

Досвід будівництва цементобетонних доріг в Україні не такий значний. Від 90-х років минулого сторіччя до 2019 року таких доріг практично не будували. Окремі ділянки доріг, що реконструйовані (Харків – Красноград) або збудовані (Київ – Ковель – Брест) із цементобетонним покриттям у середині 2000-х років, є винятком і тільки підтверджують загальну тенденцію [10]. Лише трохи більше 1% від всієї транспортної мережі становлять жорсткі покриття автомобільних доріг [11]. Україна довгий час використовувала асфальтобетон як основний матеріал для дорожніх покриттів. Але на сьогодні вже є діючі нормативні документи, що регулюють вимоги проектування та використання цементобетону для жорстких покриттів доріг: ГБН В.2.3-37641918-557 [12] і ДСТУ 8858 [13]. Останнім часом уряд та інші зацікавлені сторони в Україні проявляють більше інтересу до використання цементобетону в дорожньому будівництві, особливо для будівництва магістралей та інших важливих транспортних об'єктів [14,15]. Одним з найвизначніших об'єктів транспортного будівництва нового часу з використанням цементобетону, можна вважати злітно-посадкову смугу міжнародного аеропорту «Одеса» [16], яку було відкрито для руху повітряних суден 16 липня 2021 р (рис.1.1).

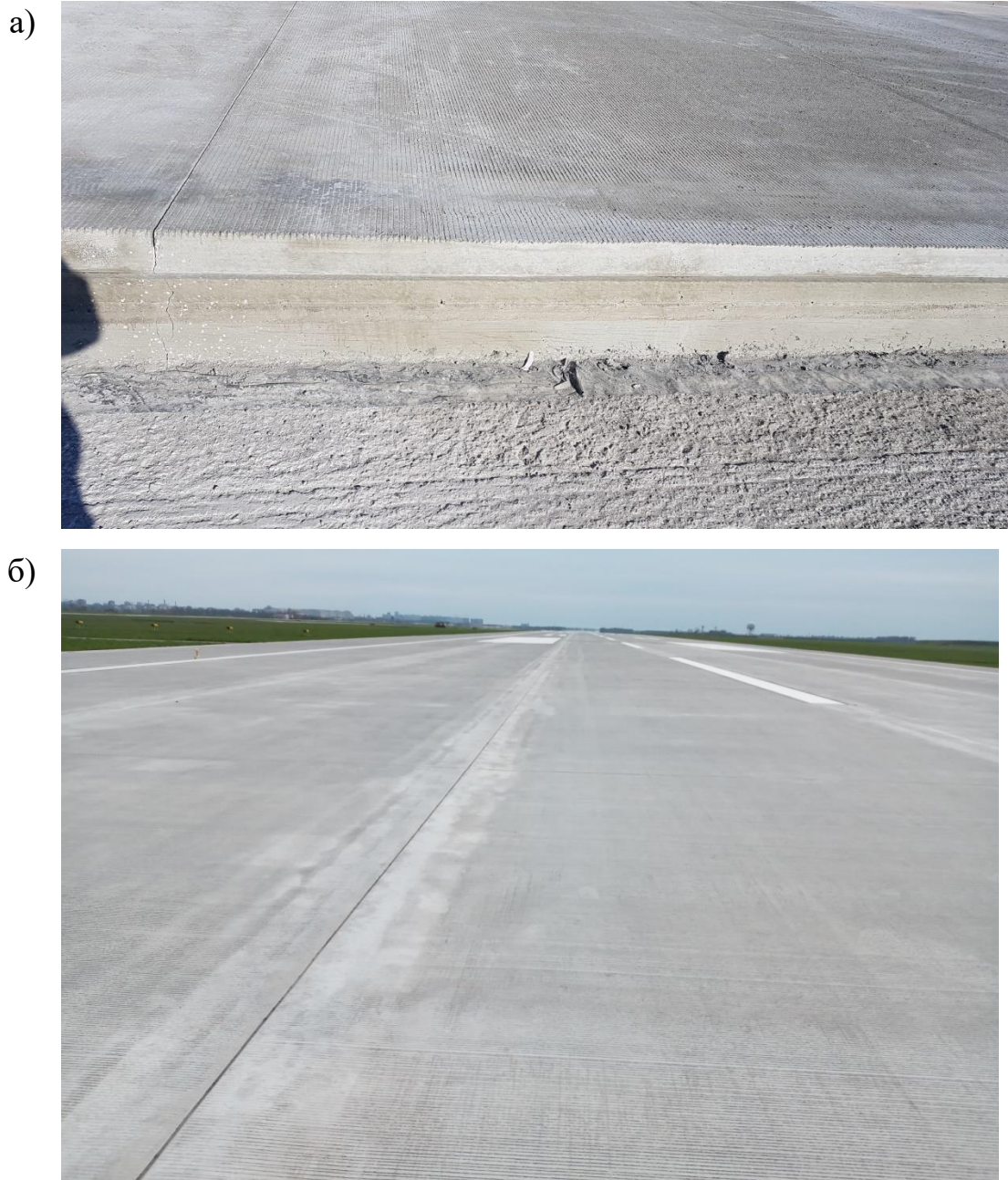


Рис.1.1 Цементобетонне покриття злітно-посадкової смуги міжнародного аеропорту «Одеса» а) в процесі будівництва, б) загальний вигляд покриття.

Додатково необхідно відзначити бетонну трасу Н-31 Дніпро-Решетилівка і трасу Н-14 Кропивницький-Миколаїв (рис.1.2) [11]. Також необхідно підкреслити, що все частіше українськими фахівцями приділяється увага дослідженням у цій області будівельного матеріалознавства.





Рис.1.2 Ділянка траси Н-14 Кропивницький-Миколаїв з цементобетонним покриттям [17].

*Гамеляк І. П.* відзначає можливість і необхідність будівництва не тільки доріг з цементобетону, а й поширити використання цієї технології для будівництва покриттів логістичних центрів, паркінгів великовантажного транспорту, під'їздів до портів та аеропортів, тощо. Це обумовлюється постійним підвищення навантаження на автомобільну вісь і сьогодні цей показник складає вже 115-130 кН [18].

*Мішутінін А. В. і Кровяковим С. О.* розглядається можливість використання бетонних і фібробетонних покриттів для будівництва об'їзних та міських доріг з великою інтенсивністю трафіку [19]. Показано успішний приклад реалізації цементобетонного покриття з дисперсним армуванням у м. Одеса по вулицям Преображенській та Новікова у 2006 р., які експлуатуються по сьогоднішній день.

*Солодким С. Й. та ін.* було проведено діагностику стану злітно-посадкової смуги міжнародного аеропорту «Львів» ім. Данила Галицького. Надані рекомендації щодо продовження строку служби, утримання і моніторингу жорсткого аеродромного покриття [20]. В свою чергу під керівництвом

*Кровякова С. О.* виконано обстеження цементобетонних покриттів злітно-посадкової смуги, руліжних доріжок та перонів міжнародного аеропорту «Одеса». Акцентується необхідність оновлення нормативної документації щодо вимог для бетонних сумішей і бетонів аеродромних покриттів з урахуванням сумісності сучасних будівельних матеріалів. Відзначається важливість моніторингу і планових обстежень аеродромних покриттів для максимізації їх довговічності [16].

*Гамеляком І. П. та Дмитриченко А. М.* накопичений досвід з контролю якості цементобетонних покриттів об'єктів програми «Велике будівництво». Проведена значна робота щодо оформлення статистичних даних з отриманих результатів по міцності на стиск та розтяг при згині. Це дає можливість тримати якість готової бетонної продукції на високому рівні і допомагає своєчасно передбачувати невідповідності стандартам [21].

*Вировим В. М. та Сухановим В. Г.* проаналізовано вплив структурних тріщин різної геометрії на морозостійкість бетонів для жорстких дорожніх покриттів. Результати показали важливість використання мінеральних наповнювачів і пластифікаторів для підвищення морозостійкості бетонів [22].

Незважаючи на великий світовий досвід будівництва доріг із жорстким покриттям, а також бетонних транспортних споруд, при їх проектуванні та розробці складів бетонів, необхідно приділяти особливу увагу використанню місцевих будівельних матеріалів. В свою чергу, це вимагає постійної оптимізації бетонних складів в залежності від кліматичної зони будівництва, інженерно-геологічних умов та проектної пропускної здатності автомагістралі чи транспортної споруди [23-26].

Дорожнє покриття працює як плита на пружній основі і основною розрахунковою характеристикою цієї конструкції є розтягуючі напруження. Крім того, одночасно на дорожню плиту діють динамічні навантаження. Від гальмування транспортних засобів виникають напруження стирання і одночасно дорожня конструкція може піддаватися впливу зовнішніх природних факторів: заморожування-відтавання, зволоження-висушування, вивітрювання,

дія агресивних протижеледних реагентів, тощо. Згідно [27] дорожні бетони відносяться до класу впливу зовнішнього середовища XD3 – корозія бетону, що спричинена хлоридами (не з морської води), зокрема у використаних антикригових речовинах; XF4 – корозія бетону, що спричинена періодичним заморожуванням/відтаванням із/без антикригових речовин. Все це говорить про те, що вимоги до дорожнього бетону значно перевищують вимоги у порівнянні з конструкційним бетоном. Ці фактори вимагають ретельного підходу при проектуванні бетонних складів. Для дорожніх бетонів особливу увагу необхідно приділяти до контролю якості вхідної сировини (цемент, пісок, щебінь) та кількості втягнутого повітря у бетонну суміш. За необхідністю підвищення міцності на розтяг при згині та тріщиностійкості, зменшення стираності та стійкості до динамічних навантажень слід використовувати дисперсне армування [28-30].

Введення фібри у свою чергу може значно знизити легкоукладальність бетонної суміші та значно підвищити кількість втягнутого повітря [31-33]. Для нівелювання таких негативних ефектів дисперсного армування необхідно застосовувати сучасні добавки суперпластифікатори, які дозволяють контролювати проектні вимоги по рухливості та вмісту залученого повітря. Важливо виділити, що такі модифікатори певним чином додатково впливають на зміну структури бетонів і як наслідок змінюють їх фізико-механічні характеристики [34].

Таким чином розробка бетонів та фібробетонів для будівництва жорстких покриттів автомобільних доріг є актуальним завданням. Дослідження різних комбінацій модифікаторів дозволить розширити наукову базу країни, що дозволить покращити якість дорожньо-транспортної сфери.

## 1.2 Вплив дисперсного армування на властивості бетонів жорстких дорожніх покриттів

Перше у світі фіброармоване дорожнє покриття було побудовано у США в 1938 р. з використанням сталеві фібри і лише більше ніж через 30 років фібробетони почали використовувати у великих масштабах. У штаті Огайо при будівництві станції зважування вантажівок та згодом при будівництві швидкісних шосе [35] і руліжних доріжок аеропорту Тампа у штаті Флорида [36] використовували сталеві фібробетон. При будівництві жорсткого покриття аеропорту О'хер м. Чікаго застосовували синтетичну макрофібру для підсилення стиків [37]. Також підкреслимо, що до 80-х років у будівельній промисловості використовувалася переважно сталева фібра.

Згодом науковці [38] провели дослідження на основі складів бетону департаменту транспорту штату Вірджинія, але з модифікуванням бетонних сумішей транспортного призначення з використанням не тільки сталеві, а і поліпропіленові фібри довжиною 19 мм та поліофінової фібри довжиною 25 та 50 мм. В якості в'язучого використовували цементи типу I (нормальний), II (з помірною сульфатостійкістю) згідно ASTM C150 [39] при витраті 377 кг/м<sup>3</sup>. Додатково додавався гранульований доменний шлак. Для збереження необхідної легкоукладальності застосовувався пластифікатор на основі нафталінів. Цікаво відзначити той факт, що у багатьох випадках гранична міцність на стиск і розтяг при згині спостерігалася вищою при регулюванні кількості втягнутого повітря за допомогою повітровтягуючої добавки. При підвищеному вмісті фібрових волокон значно підвищувалася ударна стійкість. Утворення першої тріщини спостерігалось при зусиллі на розтяг при згині більше 5 МПа у всіх випадках.

З розвитком технології фіброармованого бетону у Нідерландах набуло поширення використання цього матеріалу для будівництва мостів. Основним типом дисперсного армування виступало полімерне волокно [40]. Великобританія та США також активно застосовують поліпропіленову фібру

для дисперсного армування бетону мостових конструкцій [41-43]. В свою чергу, автори [44] відзначають ефективність застосування скляної фібри при будівництві мостів. Чисельний та натурний експерименти відображають зниження середніх напружень згину досліджених фібробетонів на 15%.

Дослідження [45] відображають можливість застосування дисперно-армованих бетонів для водопропускних труб з використанням поліпропіленової та базальтової фібри довжиною 50 мм. В'язучим компонентом виступав цемент класу міцності 52,2 [46], проектна міцність бетону 50 МПа. Встановлено позитивний ефект фібрових волокон обох типів на підвищення тріщиностійкості та міцності на сколювання бетону. За даними [47] максимальна міцність на стиск бетону армованого синтетичною фіброю довжиною 50 мм досягалася при дозуванні  $6 \text{ кг/м}^3$  і становила 41 МПа. Прогин випробуваної фібробетонної труби зменшився на 10%, при граничному розкритті тріщин 2,5 см. Згідно технічної документації [48] відзначається особлива необхідність застосування синтетичних типів фібри для виробництва та експлуатації водопропускних споруд.

У експерименті [49] було застосовано базальтові фіброволокна довжиною 5-15 мм для підвищення тріщиностійкості бетону та міцності на розтяг, з метою можливості будівництва тунелів у складних геологічних умовах, а саме у місцях розломів тектонічних плит. Встановлено, що оптимальна витрата базальтової фібри у кількості 0,5 % за об'ємом бетону знижує довжину граничних тріщин на 33%, в свою чергу їх ширина розкриття зменшилася на 38%. Міцність фібробетону на сколювання підвищилась на 73%.

Окрім використання фібробетонів для будівництва транспортних споруд, окрема увага приділяється дослідженням, які присвячені жорстким дорожнім покриттям на основі цього матеріалу. Як зазначалося раніше, дорожня конструкція експлуатується у сурових умовах і сприймає навантаження не тільки від руху транспорту, а й одночасно піддається впливу навколишнього середовища. Це вимагає проектувати дорожні бетонні суміші та бетони на їх основі з підвищеними показниками міцності та морозостійкості, а також

низькою стиранистю та усадкою для забезпечення безперебійного і безпечного руху транспорту на протязі всього терміну експлуатації.

*Поліпропіленова фібра.* Автори [50] для дисперсного армування бетонів використовували поліпропіленову фібру довжиною 12 мм. Досягнення найкращих фізико-механічних показників фібробетонів було встановлено з кількістю фібри 1,2-1,6 кг/м<sup>3</sup>, при витраті цементу від 400 до 500 кг/м<sup>3</sup> з частковою заміною на метакаолін у кількості 15-20 кг/м<sup>3</sup> і використанням пластифікатору полікарбоксилатного типу. Так міцність на стиск у віці 28 діб складала від 55 до 70 МПа, стиранисть не перевищувала 0,35 гр/см<sup>2</sup>, а морозостійкість досягала марки F200 як для дорожніх бетонів згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96 [51].

Додаткове підтвердження ефективності поліпропіленової фібри різної довжини на підвищення властивостей бетонів показано у [52]. З кількістю фібри 0,9 кг/м<sup>3</sup> (довжина 12 і 18 мм) досягалося підвищення міцності фібробетону у 1,2...1,7 разів, при одночасному підвищенні морозостійкості та корозійної стійкості. При використанні інших поліпропіленових волокон довжиною 23 та 39 мм міцність бетону на розтяг при згині збільшувалася на 20% і складала 6-7 МПа після 28 діб твердіння. Міцність на стиск підвищувалась незначно, а у деяких випадках мала тенденцію до зниження [53].

Дослідження [54] також відображає позитивний вплив поліпропіленового волокна довжиною 39 мм з витратою 1,5-1,9 кг/м<sup>3</sup> на підвищення міцності та морозостійкості дорожніх бетонів, і зниження їх стиранисті. Міцність на стиск у проектному віці оптимізованих складів фібробетонів була не менше 65 МПа, а проектна міцність на розтяг при згині не менше 6 МПа.

Згідно [55,56] ретельно підібрані склади бетонів з введенням поліпропіленової фібри довжиною 12 мм дозволяють підвищити міцність на розтяг при згині вже при вмісті фібри від 1,35 кг/м<sup>3</sup>. Максимальна тріщиностійкість досягається з кількістю фібри від 1,6 кг/м<sup>3</sup>, що характеризується показником питомих енерговитрат, який зростає на 44% для

досягнення критичного стану випробуваних фібробетонів, що додатково підтверджено у [57].

З економічної точки зору, поліпропіленова фібра надає кращий армуючий ефект у порівнянні зі сталевією фіброю. У [58] показана вища міцність на розтяг при згині дорожніх фібробетонів з кількістю поліпропіленової фібри у діапазоні 2-2,5 кг/м<sup>3</sup> у порівнянні з сталевієфібробетонами з кількістю сталевих волокон від 15 до 20 кг/м<sup>3</sup>. Також спостерігається, що бетони з поліпропіленовією фіброю мають кращу стійкість у кислотному середовищі, та мають знижені показники стираності. Це додатково підвищує їх довговічність у порівнянні з дисперсно-армованим бетоном зі сталевією фіброю. У США було проведено ряд досліджень, які підтверджують ефективність поліпропіленових волокон для модифікування цементобетонних покриттів [59].

*Сталева фібра.* Як вже було описано раніше, перше у світі дисперсне армування дорожніх бетонів проводилося з використанням сталевих волокон і довгий час знаходилося єдиним раціональним типом фібри для виробництва фібробетонів. Необхідно відзначити, що і у останні роки сталева фібра залишається ефективним компонентом модифікування бетонів для дорожньо-транспортних споруд [60,58].

Науковцями [61-63] виявлено, що навіть після впливу агресивного середовища на сталевієфібробетонні зразки, матеріал зберігає свої високі фізико-механічні властивості. Крім того, при сучасних технологіях виробництва сталевієї фібри застосовується метод гальванізації для надання волокнам додаткових антикорозійних властивостей [64,65], а використання інгібіторів корозії [66-68] виключає можливість руйнування сталевієї фібри під дією агресивних середовищ.

Підвищення такого важливого показника для дорожніх бетонів як зносостійкість теж можливе з використанням дисперсного армування. Авторами [69] проводилося модифікування бетонів сталевією фіброю трьох типів: короткі прямі волокна довжиною 12 мм, анкерна фібра довжиною 35 мм і

хвиляста фібра довжиною 38 мм. Дозування всіх типів волокон складало 1 кг/м<sup>3</sup>. Середнє зниження показника стираності становило 30%.

Окремо необхідно відзначити вплив сталевих фібрових волокон на зниження усадки дорожніх фібробетонів. Ця характеристика значно підвищує якість жорстких дорожніх покриттів з точки зору їх довговічності. Згідно дослідження отримано сталеві фібробетони з усадкою, яка не перевищує 0,25 мм/м при витраті сталеві анкерної фібри довжиною 50 мм від 50 кг/м<sup>3</sup> бетону [58].

*Скляна фібра.* У сучасному виробництві зазвичай виготовляється скловолокно з лугостійким покриттям. Це дозволяє використовувати такий вид фібрових волокон для дисперсного армування бетонів [70-73] і забезпечувати високі показники міцності та довговічності.

Авторами [74] відзначається ефективність скляної фібри у кількості 1 кг/м<sup>3</sup> для підвищення міцності на стиск, міцності на розтяг при згині та міцності на сколювання. Окремо приділяється увага модифікації бетонних сумішей летучою золою та мікрокремнеземом для зниження лужного показника рН, що додатково підвищило довговічність отриманих фібробетонів.

У статті [75] встановлено додатковий фінансовий ефект застосування скляних волокон у порівнянні зі сталевими та поліпропіленовими для бетонів жорстких дорожніх покриттів. Описана можливість зниження товщини дорожньої плити до 50% з введенням у бетонну суміш скляних волокон. Дисперсне армування скляною фіброю у кількості 0,4% від об'єму бетонної суміші дозволяє отримати дорожні бетони з проектною міцністю на розтяг при згині 9,7 МПа [76]. При цьому міцність на сколювання досягала 4,9 МПа. На основі таких результатів зроблений висновок про можливість зменшення загальної товщини несучого шару дорожнього одягу, що дає можливість значно зберігати фінансові витрати при будівництві доріг на основі бетону армованого скляною фіброю.

Вченими [77] розроблено і оптимізовано склади дорожнього бетону з дисперсним армуванням скляними волокнами для підсилення проблемних



ділянок жорстких дорожніх покриттів у стиках. Відзначається значне підвищення тріщиностійкості до 35%. Такі результати дозволяють знизити витрату сталевих дюбелів при з'єднанні збірних дорожніх покриттів доріг.

Огляд [78] описує можливість використання різних типів фібрового армування, зокрема скляною фіброю згідно [79] для виробництва бетонів для жорстких дорожніх покриттів доріг.

У [80] дорожні укочувані фібробетони, армовані скляними волокнами довжиною 1 см у кількості 2 % від об'єму бетону, знизили показник стираності на 5% при однаковій міцності на розтяг при згині з контрольним бетоном 6 МПа. Тобто можна зробити висновок про ефективність застосування коротких скляних волокон для підвищення зносостійкості бетонів.

Вивчення закономірностей зміни усадочних деформацій бетонних плит на пружній основі, з дисперсним армуванням скляною фіброю з витратою від 5 до 10 кг/м<sup>3</sup> показують, що загальна усадка після 300 днів твердіння не перевищує 0,5 мм/м [81]. Також за допомогою спеціального моніторинга визначалася усадка верхньої та нижньої частини плити. Так усадочні деформації не перевищують 0,42 мм/м у верхньому шарі та 0,3 мм/м у нижньому шарі плити. Хоча методика визначення усадочних деформацій для великогабаритних натурних експериментів потребує уточнення, загальна тенденція впливу дисперсного армування на зниження цього показника добре простежується.

*Карбонова фібра.* У роботі [82] за допомогою вбудованих датчиків, руйнівних та неруйнівних методів проводилося спостереження за якістю дорожнього бетону на зупинках міського транспорту. Порівнюючи якість бетону без дисперсного армування з фібробетоном армованим карбоновими волокнами, встановлено зростання міцності на розтяг при згині до 26% при дозуванні карбонової фібри у діапазоні 0,5-1%, при проектній міцності бетону на стиск 30 МПа. Результати руйнівного та неруйнівного контролю були добре узгоджені між собою і це свідчить про високу якість укладеного дорожнього бетону.

Для розробки тонких бетонних шарів покриття автомобільних доріг були проведені випробування карбонових фібробетонів [83]. Експериментально підтверджено ефективність такого типу дисперсного армування на підвищення морозостійкості дорожніх бетонів, а також збільшення їх адгезійної міцності до нижнього шару покриття більше ніж у два рази. Такі високі показники якості забезпечують ефективне використання карбонової фібри для тонких шарів покриття автомобільних доріг.

Фібробетони [84] з карбованими волокнами довжиною 19 мм у кількості 0,1% від об'єму бетону відзначаються зниженою тріщиностійкістю та усадкою при висиханні, що позитивно впливає на підвищення довговічності бетонів дорожніх покриттів.

У [85] застосовувалася карбонова фібра довжиною 5 мм у кількості 0,2% від об'єму бетону. Було встановлено зниження усадки при висиханні у віці 14 діб на 84 %, деформації не перевищували 19 мм/м.

Крім того, додатковий ефект карбонової фібри як ефективного теплопровідного матеріалу показано у [86-88]. Цю властивість можна використовувати для самоочищення доріг від снігу та льоду, а це може додатково знижувати кошти на обслуговування доріг та злітно-посадкових смуг аеропортів у зимовий період [89, 90].

*Базальтова фібра.* Вище було згадано деякі випадки використання базальтової фібри для модифікації бетонів транспортних споруд. Окрім високих показників міцності, стійкості у агресивному середовищі, термічної стабільності, екологічності та високої стійкості до стирання [91] без додаткових витрат при виробництві, базальтові волокна є доступним матеріалом на ринку України [92]. Це дає змогу використовувати даний локальний матеріал для дисперсного армування бетонів жорстких дорожніх покриттів, що є несумнівною перевагою з точки зору економічної ефективності.

Авторами [93-95] підкреслюється ефективність введення базальтових волокон довжиною 12 і 24 мм з витратою 2-4 кг/м<sup>3</sup> у бетонну суміш, що сприяє додатковому зростанню міцності на розтяг при згині до 20%. Також

відзначається можливість уникнення розшарування бетонних сумішей на основі сталевих волокон з додаванням базальтових волокон. Такий результат позитивно впливає на однорідність структури бетонів для жорстких дорожніх покриттів, що забезпечує їх високу експлуатаційну надійність та довговічність.

В свою чергу, згідно джерелу [96] фібробетони з застосуванням базальтової фібри мають підвищені показники зносостійкості (знижена стираність), а так як дорожнє покриття постійно піддається впливам такого характеру, цей показник може суттєво підвищити резистентність до колієутворення. Однак відзначається, що для кожного окремого випадку, необхідно ретельно контролювати вихідні параметри для забезпечення проектних вимог даного типу фібробетону, тому що ефективність базальтової фібри не має прямої залежності від її кількості. Це додатково підтверджується у роботі [97] де введення базальтових волокон довжиною 24 мм та 50 мм у кількості  $1 \text{ кг/м}^3$  не призвело до покращення фізико-механічних властивостей фібробетонів.

Експериментально встановлено [98], що використання базальтової фібри різної довжини (12 мм, 36 мм, 50 мм) у кількості  $8 \text{ кг/м}^3$  бетону, в середньому підвищує міцність на розтяг при згині на 14%. Були отримані фібробетони з міцністю на розтяг при згині у діапазоні 5,5-6 МПа у віці 28 діб. Показник стираності було знижено на 33%. Окремо відзначається незначне зниження міцності на стиск у всіх випадках дисперсного армування базальтовими волокнами, але всі фібробетони у проектному віці мали міцність на стиск не менше 40 МПа.

Вченими [99] звертається увага на можливий деякий негативний вплив перевищення кількості базальтової фібри довжиною 12 і 24 мм на фізико-механічні властивості фібробетонів, а саме зниження міцності на стиск, розтяг при згині та сколюванні. Такі явища спостерігалися при витраті базальтових волокон довжиною 12 мм у кількості  $12 \text{ кг/м}^3$  і при витраті фібри від 4 до  $8 \text{ кг/м}^3$  довжиною 24 мм. Витрата цементу у всіх складах бетонів була  $400 \text{ кг/м}^3$ , максимальний розмір заповнювача 20 мм. Для підвищення міцності на розтяг

при згині з використанням базальтової фібри рекомендовано ретельно підбирати гранулометрію заповнювачів. У розглянутому конкретному випадку оптимальний вміст фібри довжиною 12 мм становив  $8 \text{ кг/м}^3$ , при цьому міцність на розтяг при згині підвищилася на 20%.

Дослідники [100] визначали вплив базальтової фібри довжиною 12 мм і сталеві фібри довжиною 30 мм на резистентність фібробетонів дорожніх покриттів під дією циклів заморожування і відтавання. Експериментальні дані показують, що дисперсне армування базальтовою фіброю у кількості 0,1% за об'ємом у порівнянні зі сталеві фіброю у кількості 2% за об'ємом має однаковий вплив на зміну властивостей бетону після випробувань на морозостійкість. Після 200 циклів заморожування-відтавання втрата маси становила 0,78%. Базальтофібробетони мали на 70% вищу зносостійкість у порівнянні зі сталеві фібробетонами, в свою чергу зниження міцності на розтяг при згині для бетонів зі сталеві фіброю було менше на 3%.

При використанні базальтових волокон довжиною 24 мм у кількості 0,5% від об'єму бетону спостерігається підвищення міцності на розтяг при згині на 46%, яка досягла 5,1 МПа [101]. Це дозволяє використовувати отримані фібробетони для будівництва автомобільних доріг.

Згідно джерела [102], оптимальна витрата базальтової фібри становила 1,25% від об'єму бетону, міцність на розтяг при згині досягала значення 6,1 МПа. Отримані фібробетони застосовувались для будівництва жорстких покриттів доріг з технологією укочуваного бетону.

Аналіз поведінки базальтофібробетону під дією навантажень різної інтенсивності показує, що вміст волокон у діапазоні 0,4-0,6% по об'єму може певною мірою покращити резистентність фібробетону для аеродромних покриттів до утворення тріщин [103].

Використання базальтових волокон довжиною 12 мм і 24 мм у кількості 2-4  $\text{кг/м}^3$  бетону знижують показники стираності до 18%. Відзначається краща робота фібри більшої довжини для досягнення вищої зносостійкості бетону [104].

Дані експерименту [105] з визначення усадочних деформацій фібробетонів з різним вмістом базальтової фібри (від 0,1 до 1% за об'ємом бетону) різної довжини (12, 25 і 43 мм), показують можливість обмеження пластичної усадки через 4 години твердіння бетону до значення не більше  $\epsilon \approx 2000 \times 10^{-6}$ . Такий результат сприяє утриманню розвитку тріщин при початковому структуроутворенні бетонних композитів, що сприятливо впливає на підвищення їх експлуатаційних показників.

Для додаткового підвищення ефективності роботи базальтової фібри при модифікуванні бетонів авторами [106,107] рекомендується її термічна обробка. Такий прийом суттєво підвищує якість фібробетонів з базальтовими волокнами і додатково сприяє підвищенню стійкості у лужному середовищі.

Щоб забезпечити всі вищеописані фізико-механічні властивості фібробетонів з використанням різних типів волокон, як за матеріалом, так і за геометричними характеристиками, важливо досягти надійне зчеплення фібри з бетонною матрицею. Вченими відзначається важливість цього параметра для ефективної сумісної роботи дисперсного армування у тілі конструкції чи споруди [95,108,109].

Проаналізовані літературні джерела не викликають сумнівів у ефективності дисперсного армування бетонів жорстких дорожніх одягів. Але необхідно підкреслити той факт, що на сьогодні об'єм накопичених знань стосовно раціонального використання базальтових волокон є невеликим у порівнянні з іншими типами фібри. І хоча похідний матеріал базальт має високі індивідуальні фізико-механічні показники, залишається багато питань стосовно його застосування для модифікування бетонних сумішей. Існує досить велика неузгодженість між результатами різних вчених. Тому підбір та оптимізація складів бетонів армованих базальтовою фіброю є актуальним завданням для накопичення додаткових знань з використання цього композиту у дорожньо-транспортному будівництві.

### 1.3 Управління структурою і властивостями бетонів жорстких дорожніх одягів за рахунок використання модифікаторів

Використання модифікаторів є важливим аспектом в сучасному будівництві жорстких дорожніх покриттів з бетону та отримує величезну увагу у світовій практиці. За рахунок таких добавок можна покращувати різні характеристики бетону, забезпечуючи оптимальний баланс між економічністю, довговічністю та міцністю [110,111].

Державний стандарт ДСТУ Б В.2.7-171:2008 [112] регулює застосування хімічних добавок для надання бетонам певних фізико-механічних властивостей. Згідно цього документу в залежності від ефекту модифікаторів їх можна поділити на: добавки, що регулюють технологічні властивості бетонних сумішей (рухливість за осадкою конусу, нерозшаровуваність); добавки, що сприяють прискоренню/сповільненню строків тужавлення, твердіння, тепловиділення; добавки, що дозволяють проводити бетонування при мінусових температурах; антикорозійні добавки для підвищення стійкості бетону у агресивному середовищі; добавки які знижують деформації усадки та розширення.

При виробництві сучасних бетонів і особливо фібробетонів невід'ємним компонентом є *суперпластифікатори*. Цей тип хімічних добавок виконує водоредукуючу функцію, що дозволяє покращувати реологічні властивості бетонних сумішей при зменшенні В/Ц відношення. Завдяки цьому структура бетону набуває більш однорідного характеру, сприяючи зростанню корисної роботи матеріалу у елементах конструкції [113].

Сьогодні, найефективнішим типом суперпластифікаторів вважаються добавки на полікарбоксилатній основі [114,115]. Основною їх перевагою є стеричний механізм взаємодії за рахунок довших ланцюгів структури [116, 117]. У порівнянні з добавками електростатичного механізму дії на основі лігносульфонатів чи формальдегідів, полікарбоксилати здатні створювати більше контактних поверхонь з цементними зернами та водою і тим самим

підвищувати інтенсивність розріджуючого ефекту. Утворюється більш пластична та текуча рідка фаза, якої достатньо для обволікання зерен великого та дрібного заповнювача при зниженій кількості води, що значно покращує легкоукладальність бетонних сумішей.

Необхідно відзначити, що позитивний вплив водоредукуючих модифікаторів залежить від рецептурно-технологічних факторів бетону. Особливу увагу треба приділяти сумісності типу цементу і суперпластифікатора [118]. Оптимальну витрату добавки можна встановити тільки лабораторним шляхом з урахуванням особливостей використовуваних сировинних матеріалів.

Серед можливих негативних ефектів модифікаторів даного типу можна відзначити сповільнення ранньої міцності бетонів [119], але як визначається у [120,121], використовуючи добавки нової генерації, можливо нівелювати цю характеристику і за необхідністю отримувати бетони з високою ранньою міцністю. З іншого боку, повільну кінетику набору міцності модифікованих суперпластифікаторами бетонів можна застосовувати як перевагу для бетонних робіт при високих температурах більше 30°C.

Таким чином завдяки сучасним добавкам суперпластифікаторам з'являється можливість керувати структурою, що є важливим інструментом удосконалення властивостей бетону. Так як бетони для будівництва дорожніх покриттів укладаються спеціальною будівельною технікою – укладальними машинами, вібратори яких працюють на певній частоті, застосування пластифікаторів дозволяє ефективно впливати на рухливість бетонних сумішей без розшарування при ущільненні. Такий підхід дає можливість адаптувати бетон до конкретних вимог, у тому числі для дорожньо-будівельної галузі де довговічність та стійкість до навантажень відіграють критичну роль [122-124].

У [125] встановлено оптимальну витрату суперпластифікатора полікарбонатного типу у кількості 1,2% від маси цементу. Водоредукуючий ефект становив 46% для дорожніх бетонів проектного класу С40/50 на цементі ПЦЦ IV/A-500 Р і 74% для бетонів проектного класу С50/60 на цементі ПЦ

П/А-Ш-500. За даними [126] застосування полікарбоксилатних пластифікаторів призводить до економії цементу на 20-30% для бетонів класу С 32/40 на звичайному портландцементі ПЦ П/А-Ш-400. У [127] спостерігається ефективність добавок пластифікуючої дії на основі полікарбоксилатів, що виражається у збереженні легкоукладальності бетонних сумішей з тривалим часом при відсутності розшарованості. Okремо підкреслюється вищий водоредукуючий ефект при використанні полікарбоксилатних суперпластифікаторів у порівнянні з лігносульфонатними. Дослідження [128,129] відображають різноманітні комбінації суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу для модифікування бетонів на цементах ПЦ І-500Н і ПЦ П/А-Ш-500. У всіх випадках визначається підвищений водоредукуючий ефект бетонних сумішей, можливість зниження кількості в'язучого для отримання високоміцних бетонів з проектною міцністю у діапазоні 60-70 МПа.

При модифікуванні дорожніх бетонів фібровими волокнами та суперпластифікаторами важливо контролювати такий параметр, як кількість втягнутого повітря, який значно впливає на показники міцності і морозостійкості бетонів. Причина полягає у складно передбачуваному впливі дисперсних волокон в залежності від їх похідного матеріалу та геометричних характеристик у комбінації з різними водоредукуючими реагентами на кількість залученого повітря у бетонну суміш [31-33,130,131]. Для регулювання цього показнику у сучасній практиці виробництва бетонів використовуються *добавки повітровтягуючої дії*.

Повітровтягуючі добавки – це поверхнево-активні хімічні речовини (ПАР), які складаються з водовідштовхувального ланцюга (неполярний вуглеводень) і ланцюга, що притягує воду (аніонний полярний). Дві основні класифікації повітровтягуючих добавок – це солі кислот, отримані з деревини (вінілові смоли і каніфоль), і синтетичні смоли.

Механізм дії хімічних добавок такого типу полягає у стабілізації мікроскопічних бульбашок, які утворюються під час перемішування бетонної суміші. Самі по собі такі добавки не формують бульбашки. Процес відбувається



шляхом зменшення поверхневого натягу води замішування, що сприяє розвитку і стабілізації бульбашок за рахунок утворення міцних оболонки, які відштовхують молекули води та не дозволяють їм зливатися [132,133]. Сформовані бульбашки діаметром 0,01-0,1 мм притягуються до цементних зерен та заповнювачів. Утворюється певний запас вільних мікропор, свого роду порожнин, в які можуть проникати замерзлі молекули води при їх розширенні. Це знижує тиск льоду на внутрішні стінки бетонної матриці. Такий ефект сприяє додатковому підвищенню резистентності тіла бетону при циклах заморожування-відтавання [22,134].

Окрім підвищення морозостійкості бетонів, добавки повітровтягуючої дії можуть сприяти зниженню розшаровуваності бетонних сумішей та підвищувати їх легкоукладальність. Це відбувається під дією створення бульбашок різних діаметрів, які утворюють більшу власну питому поверхню, знижують нижню межу текучості та пластичної в'язкості, що сприяє збільшенню товщини розчинної складової на поверхні заповнювачів тим самим покращує реологічні властивості бетонної суміші [135,136].

Дослідження [137] показують, що при витраті повітровтягуючої добавки у діапазоні 0,5-1% від маси цементу рухливість сумішей підвищилася на 30% без додаткового використання пластифікаторів. Дані [138] також відображають тенденцію підвищення легкоукладальності бетонних сумішей при введенні добавки повітровтягуючої дії у кількості 0,3-0,5%. Спостерігалось підвищення показника рухливості за осадкою конуса майже на 100% .

Основними факторами, які впливають на кількість залученого повітря у бетонні та фібробетонні суміші є: тип та хімічний склад повітровтягуючої добавки, кислотність цементу, активні мінеральні добавки, форма поверхні заповнювачів, водоцементне відношення, кількість та тип фібрових волокон, температура навколишнього середовища та наявність інших хімічних добавок [139,140]. Серед можливого негативного впливу повітровтягуючих модифікаторів слід відзначити експериментально встановлений факт – 1% залученого повітря у бетонну суміш знижує проєктну міцність бетону у віці 28

діб на 3-5% [141,142], модуль пружності на 3-6% та міцність на розтяг при згині на 2-4% [143].

Тим не менш, за рахунок повітровтягуючих добавок з'являється можливість керування структурою дорожніх бетонів, що покращує енергетичні показники тріщиностійкості та підвищує якість цементобетонних покриттів [144]. Відзначимо, що при проектуванні та оптимізації складів дорожніх бетонів необхідно обов'язково брати до уваги всі вище перелічені фактори впливу для забезпечення певних проектних параметрів жорстких покриттів доріг.

Як відзначалося раніше, основною функцією повітровтягуючих добавок є регулювання порової структури бетону. Для дорожніх бетонів морозостійкість це один з найважливіших показників забезпечення їх довговічності. З цього приводу характер розподілення мікропор по об'єму бетону відіграє суттєве значення для підвищення стійкості дорожніх бетонів при перемінному заморожуванні/відтаванні [145].

У [138] досліджені бетони з кількістю залученого повітря у діапазоні 4,2-6,6% мали найвищу морозостійкість (300 циклів). Такий об'єм повітря у бетонній суміші досягався додаванням повітровтягуючої добавки у кількості 0,1-0,3 % від маси цементу.

Цікаво відзначити експеримент [146] з визначення стійкості бетону до утворення сольових відкладень, які у комбінації з заморожуванням та відтаванням наносять значний руйнівний ефект покриттям доріг. Відзначається найбільше підвищення опору бетону до сколювання під дією 3% розчину NaCl при кількості повітровтягуючого реагенту від 1,1 до 1,4 кг/м<sup>3</sup> бетону. Структурний аналіз мікропорової структури показав можливість підвищення морозостійкості бетону при витраті добавки у цьому діапазоні.

При дослідженні впливу повітровтягуючої добавки на властивості бетонних сумішей і бетонів для 3D друку [147], було встановлено оптимальну витрату модифікатора у діапазоні 0,06-0,12% від маси цементу. При таких

значеннях вдалося запобігти втрати проектної міцності на стиск і розтяг при одночасному підвищенні морозостійкості.

У [148] бетони модифікувалися поліпропіленою фіброю у кількості  $8 \text{ кг/м}^3$  з додаванням повітровтягуючої добавки 0,4% від маси цементу та суперпластифікатором полікарбосилатного типу у кількості 1,2% від маси цементу. Міцність отриманих фібробетонів на стиск у віці 28 діб становила не менше 65 МПа. Фіксувалося незначне зниження питомої енергії тріщиноутворення, що може нівелюватися за рахунок корегування складів фібробетонів.

При науковому супроводі будівництва транспортних об'єктів [149], накопичені знання стосовно особливостей повітроутягнення у дорожні бетони та фібробетони. Встановлено, що при кількості втягнутого повітря від 3,4 до 3,7% морозостійкість бетонів відповідає марці не нижче 300. При цьому, модифікування бетонів поліпропіленою фіброю може додаткового підвищити кількість втягнуто повітря, що дозволяє знизити витрату повітровтягуючої добавки.

Деякою проблемою при підборі складу дорожніх бетонних і фібробетонних сумішей можуть стати розмиті вимоги національних стандартів щодо кількості втягнутого повітря, які викликають певні питання. Згідно ДСТУ 8858:2019 [13] для верхніх шарів жорстких дорожніх покриттів мінімальна кількість залученого повітря становить не менше 4% без вказання максимального значення. Стандарт ДСТУ Б В.2.7-176:2008 [27] також рекомендує мінімальне значення втягнутого повітря у кількості 4% без вказування максимального порога цього показника. У діючому ГБН В.2.3-37641918-557:2016 [12] взагалі відсутня інформація про можливу кількість втягнутого повітря, в той час як у попередньому йому, зараз недіючому стандарту ВБН В.2.3-218-008-97 [150], було рекомендовано вміст повітря від 4 до 6% для бетонних дорожніх сумішей. Такі рекомендації діючої нормативної документації можуть ввести в оману при підборі складу бетону та оцінці його якості. Авторами відзначається [31,151], що без регулювання нижньої та

верхньої межі кількості залученого повітря отримати необхідну проектну міцність і морозостійкість бетонів та фібробетонів дуже важко. Отже, задача дослідження впливу повітровтягуючих добавок у комплексі з фібровим армуванням та водоредукуючими добавками все більше набуває важливого значення.

#### **1.4 Робоча гіпотеза, мета і завдання роботи**

При будівництві нових автомагістралей, зокрема першої та другої категорії з високою інтенсивністю руху, дорожній одяг піддається суровому динамічному впливу з одночасною дією природних факторів. Такі умови експлуатації вимагають дуже ретельно підходити до вирішення питання з вибору основного матеріалу дорожнього покриття. Проведений аналіз літературних джерел вказує на тенденцію зростання кількості автомобільних доріг з цементобетонним покриттям. Високі показники міцності на розтяг при згині, підвищеної морозостійкості та зносостійкості, а також стійкості до колієутворення дозволяють значно подовжувати міжремонтні строки жорстких покриттів доріг. Крім цього, цементобетонні покриття мають краще зчеплення з автомобільними шинами, а це сприяє підвищенню безпеки дорожнього руху і зменшує витрату палива транспортних засобів. Але самим великим плюсом будівництва покриттів такого типу для нашої країни – це наявність всіх необхідних будівельних матеріалів, що виключає необхідність імпортування дорогих бітумних матеріалів для виробництва асфальтобетону. У сукупності все це є перспективою для заощадження коштів на утримання доріг і може сприяти додатковому розвитку дорожньої мережі України.

Не зважаючи на багато успішних досліджень по модифікації дорожніх бетонів сучасними технологічними прийомами, питання комплексної дії добавок суперпластифікаторів, повітровтягуючих реагентів і дисперсного армування базальтовими волокнами не можна вважати вирішеним. Зокрема є певні непорозуміння між експериментальними дослідженнями і діючими

нормативними документами. Це викликає необхідність проведення додаткових досліджень, особливо щодо оптимальної витрати базальтової фібри та її впливу на кількість залученого повітря при приготуванні бетонних сумішей, що в свою чергу може значно варіювати фізико-механічні показники дорожніх фібробетонів.

Серед вітчизняних вчених питаннями оптимізації та забезпечення якості бетонів і фібробетонів займалися: Дворкін Л. Й., Вировой В. М., Толмачов С. М., Солодкий С. Й., Саницький М. А., Мішутін А. В., Гамеляк І. П., Дерев'янку В.М., Кровяков С. О., серед зарубіжних слід відзначити Van Dam T., Amirkhanian A., Spyridis P., Kosmatka S., Wang G. та інші. Важливим критерієм визначається знаходження компромісу між оптимальною витратою хімічних модифікаторів та дисперсних волокон, для надання бетонам заданих проєктних характеристик, які будуть зберігатися під час всього періоду експлуатації дорожнього одягу. Так як для дорожніх бетонів основною характеристикою є міцність на розтяг при згині, необхідно чітко встановлювати технічні регламенти за типом та кількістю використання фібри, адже не завжди підвищений вміст дисперсних волокон дозволяє поліпшувати показник міцності на розтяг при згині.

Ґрунтуючись на проаналізованих даних, була визначена **робоча гіпотеза досліджень** про доцільність використання базальтової фібри у комбінації з добавкою суперпластифікатором полікарбосилатного типу для впливу на структуру бетону, який забезпечить підвищення показників міцності та довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів. Довговічність бетонів дорожніх одягів обумовлюється насамперед їх високою морозостійкістю і низькою стираністю. Окремо доцільно визначити вплив на структуру та ефективність повітровтягуючої добавки при її використанні в модифікованих фібробетонах дорожніх покриттів.

Спираючись на робочу гіпотезу і проведений огляд технічної літератури була сформульована **мета дисертаційної роботи**: розробка модифікованих фібробетонів для жорстких дорожніх покриттів з підвищеною міцністю та

довговічністю за рахунок використання раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатора полікарбосилатного типу.

Завдання, які спрямовані для досягнення поставленої мети, детально описані у вступі дисертаційної роботи.

## **Висновки до розділу 1**

1. Світова тенденція у розвинутих країнах показує певний вектор розвитку дорожньо-будівельної галузі у напрямі збільшення об'ємів будівництва дорожніх покриттів жорсткого типу. Такі покриття забезпечують якість пасажирських та вантажних перевезень за рахунок високих експлуатаційних показників дороги. Висока рівність та стійкість до колеєутворення додатково підвищують безпеку дорожнього руху. Хоча вартість будівництва асфальтобетонних покриттів нижча у порівнянні з цементобетонними, це нівелюється завдяки зменшенню витрат на утримання жорстких покриттів, а також підвищенням їх міжремонтних строків.

2. Ефективним прийомом підвищення міцності на розтяг при згині, як основної характеристики дорожніх бетонів, а також морозостійкості та зносостійкості бетону, є додавання базальтової дисперсної арматури. Це додатково сприяє можливості зниженню товщини дорожньої плити, що підвищує економічну ефективність жорстких покриттів доріг.

3. Для забезпечення необхідної легкоукладальності фібробетонів і зниження В/Ц відношення слід використовувати сучасні полікарбосилатні суперпластифікатори.

4. Кількість втягнутого повітря при приготуванні фібробетонів може змінюватися у невизначених діапазонах в залежності від сировинних матеріалів, факторів навколишнього середовища і технології виробництва. Ефективним прийомом регулювання цього показника є використання добавок повітровтягуючої дії.

5. На основі проаналізованих літературних джерел була викладена наукова гіпотеза та сформульована мета дисертаційної роботи.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ І ХАРАКТЕРИСТИКА ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 2.1 Загальна схема проведення досліджень

Дослідження властивостей та пошук оптимальних складів бетонів і фібробетонів для жорстких дорожніх покриттів проводилося у три пов'язаних етапи.

На **першому етапі** було проведено дослідження впливу базальтової фібри і повітровтягуючої добавки на структуру, міцність, зносостійкість і морозостійкість бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Також контролювалися основні структурні параметри бетонів, такі як середня густина та водопоглинання, а також кількість залученого до суміші повітря.

Всі бетони при цьому модифікувалися суперпластифікатором полікарбоксилатного типу STACHEMENT 2570/5/G у рівній кількості 0,6% від маси цементу. Кількість цементу у складі бетонів і фібробетонів при цьому також не варіювалася (для базових складів вона була 350 кг/м<sup>3</sup>), а коригувалися разом з кількістю заповнювачів в залежності від використання повітровтягуючої добавки, що викликано різною кількістю повітря, залученого до суміші.

Результати даного етапу описані у розділі 3 дисертації.

**Другий етап** досліджень було проведено з врахуванням результатів першого етапу.

За оптимальним планом проведено експеримент, в якому варіювалися три фактори складу фібробетонів жорсткого дорожнього покриття: кількість портландцементу, базальтової фібри і суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G.

Таким чином, другий етап експериментальних досліджень розширює діапазон використання отриманих результатів першого етапу досліджень для влаштування жорстких покриттів доріг різних категорій. Даний етап виявляє



вплив кількості суперпластифікатору і фібри на властивості бетонів з різною кількістю цементу.

На другому етапі досліджень визначалася міцність фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у ранньому і проєктному віці, а також їх зносостійкість, морозостійкість, середня густина і водопоглинання. Аналогічно першому етапу досліджень контролювалася кількість залученого до суміші повітря.

Результати другого етапу досліджень описані у розділі 4 дисертації.

**Третій етап** досліджень був присвячений впровадженню результатів досліджень у навчальний процес та виробництво, зокрема отриманих раціональних складів фібробетонів з високою міцністю та довговічністю.

Результати даного етапу описані у розділі 4.8 дисертації.

## **2.2 Методика досліджень фізико-механічних властивостей і структури фібробетонів транспортних споруд та дорожніх одягів**

При виконанні експериментальних досліджень перемішування бетонних і фібробетонних сумішей проводилося в лабораторному змішувачі примусового типу. Рухомість сумішей визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002 «Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань» [152].

Базальтова фібра для забезпечення її рівномірного розподілу в суміші вводилася в бетонозмішувач після подачі щебеню і піску безпосередньо до введення цементу та води з добавкою (добавками).

Виготовлення зразків досліджених бетонів і фібробетонів та їх зберігання проводилося згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками» [153]. Дозування портландцементу, щебеню, піску і фібри проводилося за масою, води і добавки – за об'ємом з врахуванням середньої густини добавок.

Твердіння зразків згідно вимог згаданого вище стандарту відбувалося в нормальних умовах при температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  та вологості  $95 \pm 5\%$ .

Для досліджених бетонних сумішей з використанням пороміру UTC-0650 (рис.2.1) визначалася кількість залученого повітря згідно методики ДСТУ Б В.2.7-114-2002 [152].



Рис.2.1 Визначення кількості залученого до бетонної суміші повітря з використанням пороміру UTC-0650

Міцність бетонів і фібробетонів на стиск та на розтяг при згині визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками» [153]. Відповідно міцність на стиск – на зразках-кубах розміром 10×10×10 см, міцність на розтяг при згині – на призмах (балках) розміром 10×10×40 см.

Середня густина і пористість бетонів і фібробетонів визначались згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення

середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» [154]. В даних випробуваннях використовувалися зразки-куби розміром  $10 \times 10 \times 10$  см.

Морозостійкість бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів визначалася прискореним методом згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 «Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні» (третьої метод) [155]. Тобто при заморожуванні і відтаванні у солоній воді, температура заморожуванні до  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Стираність бетонів і фібробетонів визначалася на колі стирання ЛКІ-3 відповідно до ДСТУ Б В.2.7-212:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стираності» [156]. Для визначення використовувалися зразки-куби розміром  $7,07 \times 7,07 \times 7,07$  см, які були отримані вирізанням зі зразків розміром  $10 \times 10 \times 10$  см (з врахуванням максимальної крупності заповнювача 20 мм).

Рентгенофазовий аналіз матриці бетону проводився наступним чином. Відокремлювалася цементуюча матриця бетону. Для цього цементно-піщаний розчин з бетону подрібнювали, потім перетирали гумовим корком і пересівали через сито №008 з розміром вічка 80 мкм. Хімічний склад цементуючої матриці бетону визначався з використанням рентгеноспектрометра ARL 9800 XP та рентгено-флуоресцентного аналізатора Elvax Light SDD Elvatech. Вивчення якісного і кількісного фазового складу цементуючої матриці бетонів було проведено на дифрактометрі типу PANalytical AERIS Macrolab за методом Рітвельда. Технічні характеристики використаного аналізатора та дифрактометра наведено в таблиці 2.1.

Макро- і мезоструктуру фібробетонів досліджували з використанням цифрового мікроскопу типу Sigeta Forvard 10-500 $\times$ , зображення якого проектується на екрані комп'ютера (рис. 2.2). Даний мікроскоп має наступні характеристики: збільшення від  $10 \times$  до  $500 \times$ , тип матриці CMOS – 5 МПа, фокусна відстань від 10 мм до 300 мм. Це дозволяє якісно встановити вигляд і особливості поверхні матеріалу, форму і розмір зерен, пор та інших структурних елементів.

Таблиця 2.1

Характеристики вимірювальної техніки та обладнання при проведенні рентгено-флуоресцентного аналізу

Найменування	Тип, марка, позначення	Клас точності, похибки
Рентгено-флуоресцентний аналізатор	Elvax Light SDD Elvatech	Діапазон від Na (11) до U (92), напруга анода рентгенівської трубки до 60 кВ, струм до 1000 мкА, SDD детектора площі 40 мм <sup>2</sup> .
Дифрактометр	PANalytical AERIS Macrolab	Система, яка замінює одиночний детектор поруч паралельно з'єднаних детекторів для забезпечення 100-кратного збільшення ефективності порівняно з традиційними пропорційними лічильниками.



Рис.2.2 Цифровий мікроскоп типу Sigeta Forvard 10-500×

### 2.3 Характеристика використаних матеріалів

При вивченні властивостей та структури бетонів і фібробетонів транспортних споруд та дорожніх одягів використовувалися перелічені нижче матеріали.

В якості в'язучих використовувався портландцемент ПЦ І-500 Р-Н виробництва філії «Волинь-Цемент» ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна», Рівненська область, м. Здолбунів [157]. Питома поверхня даного цементу складає 3600 м<sup>2</sup>/кг, хіміко-мінералогічний склад його клінкеру наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Хіміко-мінералогічний склад клінкеру портландцемент ПЦ І-500 Р-Н виробництва філії «Волинь-Цемент» ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна»

Назва і позначення показника	Кількісне значення
Трикальцієвий силікат, C <sub>3</sub> S	59,8 %
Двохкальцієвий силікат, C <sub>2</sub> S	16,7 %
Трикальцієвий алюмінат, C <sub>3</sub> A	6,7 %
Чотирьохкальцієвий алюмоферит, C <sub>4</sub> AF	14,3 %
Оксид кальцію, CaO	65,91 %
Оксид кремнію, SiO <sub>2</sub>	21,55 %
Оксид алюмінію, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,55 %
Оксид заліза (III), Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7 %
Оксид заліза (II), FeO	-
Оксид магнію, MgO	1,26 %
Оксид калію K <sub>2</sub> O	0,35 %
Вміст іону хлору, Cl <sup>-</sup>	0,010 %
Нерозчинний залишок, НЗ	0,45 %
Втрати при прожарюванні, ВПП	0,5 %
Ангідрид сірчаної кислоти SO <sub>3</sub>	2,56 %
Луги в цементі в перерахунку на Na <sub>2</sub> O	0,65 %

Цемент виготовляється на основі портландцементного клінкеру ТУ У 23.5-00030937-018:2019, та за відомостями виробника характеризується швидким набором міцності з високим виділенням тепла і стабільністю якісних параметрів, що важливо для бетонів дорожніх покриттів.

Виробник рекомендує застосування даного цементу при будівництві конструкцій з підвищеними вимогами щодо міцності та морозостійкості, зокрема дорожніх і аеродромних покриттів [158].

У якості заповнювачів для досліджених бетонів і фібробетонів використовувалися наступні матеріали.

Гранітний щебінь фракції 5-20 мм (походження – Новобузькій район Миколаївської області). Насипна густина щебеню 1345 кг/м<sup>3</sup>. Зміст пилюватих частинок в щебені складає 0,5 %. Марка гранітного щебеню за дробимістю 1200, вміст зерен пластинчастої форми 22,5 %. Щебінь відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 «Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови» [159].

Кварцовий пісок з модулем крупності 2,2, митий. Насипна густина піску 1435 кг/м<sup>3</sup>. Зерновий склад кварцового піску наведено у таблиці 2.3.

Даний пісок використовувався на першому етапі досліджень.

Таблиця 2.3

Зерновий склад кварцового піску з модулем крупності 2,2

(використовувався на першому етапі досліджень)

Остатки на ситах	Розмір отворів сит, мм					Прохід скрізь сито 0,16
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
частні, %	3,25	8,25	28,7	34	16,75	9,05
повні, %	3,25	11,5	40,2	74,2	90,95	

Кварцовий пісок з модулем крупності 2,0, митий. Насипна густина піску 1472 кг/м<sup>3</sup>. Зерновий склад кварцового піску наведено у таблиці 2.4.

Даний пісок використовувався на першому етапі досліджень.

Таблиця 2.4

Зерновий склад кварцового піску з модулем крупності 2,0  
(використовувався на другому етапі досліджень)

Остатки на ситах	Розмір отворів сит, мм					Прохід скрізь сито 0,16
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
частні, %	0,5	3,0	17,25	55,5	21,75	2,0
повні, %	0,5	3,5	20,75	76,25	98,0	

Походження пісків – Вознесенський район Миколаївської області. Піски відповідали 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» [160].

У якості модифікаторів використовувалися:

- добавка суперпластифікатор STACHEMENT 2570/5/G виробництва ТОВ «Стахема Львів-сервіс». Виробляється на основі полікарбоксилатів [161];

- повітровтягуюча добавка MICROPORAN виробництва ТОВ «Стахема Львів-сервіс» [161].

У якості дисперсної арматури використовувалася базальтова фібра BAUCON®-bazalt з довжиною волокон 12 мм і діаметр 18 мкм. Виробник фібри – ТОВ «Баутех-Україна» [162]. Зовнішній вигляд волокон показано на рисунку 2.3.

Для приготування бетонних і фібробетонних сумішей використовувалася вода, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011 «Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови» [163].





Рис.2.3 Вигляд волокон базальтової фібри BAUCON®-bazalt

#### **2.4 План експерименту другого етапу досліджень і варійовані в експерименті фактори**

Дослідження структури та властивостей фібробетонів жорстких дорожніх покриттів (на другому етапі роботи) проводилися з використанням методів планування експерименту та експериментально-статистичного моделювання за оптимальним 15-ти точковим симетричним 3-х факторним планом [164-167]. Варіювалися наступні фактори складу фібробетонів:

- $X_1$ , кількість портландцементу, від 290 до 350 кг/м<sup>3</sup>;
- $X_2$ , кількість базальтової фібри, від 0,9 до 1,5 кг/м<sup>3</sup>;
- $X_3$ , кількість суперпластифікатору, від 0,6 до 1% від маси цементу.

Такий вибір факторів та діапазону їх варіювання був прийнятий з врахуванням результатів першого етапу експериментальних досліджень. Детальніше це описано у параграфі 4.1.



План експерименту і склади досліджених на другому етапу роботи фібробетонів наведені у таблиці.2.5.

Таблиця 2.5

План експерименту другого етапу досліджень  
і склади досліджених фібробетонів

№ точки	Рівні факторів			Склад фібробетону (кг/м <sup>3</sup> )					
	X <sub>1</sub> портландцемент	X <sub>2</sub> базальтова фібра	X <sub>3</sub> добавка STACHEMENT	Портландцемент	Щебінь	Пісок	Базальтова фібра	Добавка STACHEMENT 2570/5/G	Вода
1	-1	-1	-1	290	1225	830	0,9	1,74	126
2	-1	-1	1	290	1225	837	0,9	2,90	122
3	-1	0	0	290	1225	833	1,2	2,32	125
4	-1	1	-1	290	1225	830	1,5	1,74	127
5	-1	1	1	290	1225	834	1,5	2,90	124
6	0	-1	0	320	1215	803	0,9	2,56	133
7	0	0	-1	320	1215	798	1,2	1,92	136
8	0	0	0	320	1215	801	1,2	2,56	134
9	0	0	1	320	1215	803	1,2	3,20	133
10	0	1	0	320	1215	801	1,5	2,56	134
11	1	-1	-1	350	1205	765	0,9	2,10	146
12	1	-1	1	350	1205	772	0,9	3,50	141
13	1	0	0	350	1205	770	1,2	2,80	143
14	1	1	-1	350	1205	763	1,5	2,10	147
15	1	1	1	350	1205	768	1,5	3,50	144

Відповідно до загальноприйнятої методики при розрахунку експериментально-статистичних моделей (ЕС-моделей) виконувався перехід від натурних перемінних до кодованих [164,165,168]. Тобто діапазон варіювання натурних перемінних приводився до інтервалу від  $-1$  до  $+1$ . Для перерахунку значення перемінних до кодованих значень використовувалася типова формула:

$$x_i = \frac{X_i - \frac{X_{i,\max} + X_{i,\min}}{2}}{\frac{X_{i,\max} - X_{i,\min}}{2}} \quad (2.1)$$

Для розрахунку ЕС-моделей та їх статистичного аналізу використовувалася програма (діалогова система) COMPEX, яка була розроблена фахівцями Одеської державної академії будівництва та архітектури. В основу діалогової системи COMPEX покладено методи, розроблені проф. В.А. Вознесенським [164,165].

При розрахунку та аналізі ЕС-моделей враховувалася прийнята помилка експерименту при двосторонньому ризику  $\alpha=0,1$ . Такий двосторонній ризик (10%) є загальноприйнятим при рішенні будівельно-технологічних задач з використанням методів експериментально-статистичного моделювання [168]. При заданому рівні ризику  $\alpha=0,1$  здійснювалася перевірка значимості коефіцієнтів ЕС-моделей, тобто перевірялася гіпотеза про відмінність оцінки коефіцієнта  $b_i$  від нуля. При перевірці використовувався критерій Гаусовської точності. Незначущі коефіцієнти, які за результатами перевірки не відрізнялись від нуля, послідовно виключалися з ЕС-моделі. Після виключення кожного незначущого коефіцієнта ЕС-модель автоматично розраховувалася без даного коефіцієнта (в програмі COMPEX). Після послідовно проведеного виключення всіх незначущих коефіцієнтів (при їх наявності) та аналізу ЕС-моделей з усіма значущими оцінками коефіцієнтів  $b_i$  перевірялася на адекватність за критерієм Фішера  $F$ . За умови, що критерій Фішера  $F$  був менше критичного для заданого

ризикі з урахуванням отриманого числа ступенів свободи  $F_{кр}(\alpha, f_{на}, f_э)$ , ЕС-модель приймалася для подальшого аналізу та прийняття інженерних рішень. При записі поліномів 3-х факторних ЕС-моделей на місці скорочених незначущих коефіцієнтів записувався коефіцієнт  $\pm 0$ .

### **Висновки за 2-м розділом**

1. Описані методи досліджень фізико-механічних властивостей і структури бетонів та фібробетонів жорстких дорожніх покриттів, а також бетонних сумішей.

2. Наведені основні характеристики використаних для приготування бетонів і фібробетонів матеріалів: портландцементу, щебеню, піску, суперпластифікатору, повітровтягуючої добавки, базальтової фібри.

3. Наведено варійовані в експериментальних дослідженнях фактори складу фібробетонів жорстких дорожніх покриттів, обґрунтовано їх вибір і діапазон варіювання. Також наведено план проведення експерименту та склади досліджених фібробетонів.

4. Прийняті у роботі методи проведення досліджень і використані в дослідженнях матеріали дають можливість вирішити поставлені завдання та досягнути поставленої мети дисертаційної роботи.

**РОЗДІЛ 3**  
**ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНІВ І ФІБРОБЕТОНІВ**  
**ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ**  
**З БАЗАЛЬТОВОЮ ФІБРОЮ І ПОВІТРОВТЯГУЮЧОЮ ДОБАВКОЮ**

**3.1 Склади досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів**

Як відмічалось у п.2.1, на першому етапі було проведено дослідження впливу базальтової фібри і повітровтягуючої добавки властивості і структуру бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів.

Було досліджено властивості 12 складів бетонів, які були поділені на 3 експериментальні серії. У кожній серії виготовлялися 4 склади з різною кількістю дисперсної арматури: без фібри, а також з базальтовою фіброю у кількості 0,50, 0,75 і 1,0 кг/м<sup>3</sup>.

В першій серії (№1 – №4) виготовлялися склади без повітровтягуючої добавки. В другій серії (№5 – №8) виготовлялися бетони і фібробетони з повітровтягуючою добавкою MICROPORAN у кількості 0,05% від маси цементу. У третій серії (№9 – №12) кількість добавки MICROPORAN складала 0,15% від маси цементу.

Такі дозування повітровтягуючої добавки були обрані за результатами попередніх експериментів та з врахуванням рекомендації виробника ТОВ «Стахема Львів-сервіс» [161]. Проміжне дозування добавки у 0,10% не було доцільним, тому що не дало суттєвої різниці у кількості залученого до суміші повітря у порівнянні з дозуванням добавки 0,05%. Крім того у попередніх експериментах було встановлено, що при такому дозуванні MICROPORAN кількість залученого повітря та рухомість суміші були більш залежні від часу перемішування, що ускладнювало порівняння властивостей бетонів і фібробетонів.

У всі досліджені бетонні суміші вводився суперпластифікатор STACHEMENT 2570/5/G у кількості 0,6% від маси цементу. Таке дозування суперпластифікатору було прийнято за результатами попередніх експериментів.

Вибір типу суперпластифікатору і повітровтягуючої добавки був зроблений з врахуванням практичного досвіду використання модифікаторів при виробництві бетонів для конструкцій різного призначення на бетонному заводі ТОВ "Євросервіс БМ" (м. Одеса). Автор даної дисертаційної роботи мала безпосереднє відношення до напрацювання такого досвіду.

Рухомість всіх бетонних сумішей була рівною S1 (ОК 2..4 см). Таку рухомість було прийнято відповідно до вимог ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво» [169], згідно яких при використанні бетоноукладача з ковзною опалубкою ОК суміші має бути від 1 од 5 см залежно від швидкості руху бетоноукладача. Склади досліджених на першому етапі роботи бетонів і фібробетонів наведені у таблиці 3.1.

Для першої серії досліджених бетонів і фібробетонів (№1 – №4) кількість портландцементу у всіх складах приймалася як 350 кг/м<sup>3</sup>. За результатами розрахунків і попередніх експериментів при такій кількості достатньо якісного цементу ПЦ І-500Р-Н та з урахуванням використання якісних митих заповнювачів досягалась можливість отримання бетонів класу на розтяг при згині  $B_{\text{тв}}$  до 4,8, що згідно вимог ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво» [169] дозволяє використовувати такі бетони при влаштуванні монолітних одношарових покриттів або верхніх шарів двошарових покриттів на дорогах будь-якої категорії, включаючи Іа, Іб та ІІ.

Кількість цементу та щебеню на м<sup>3</sup> бетону коригувалися при використанні добавки MICROPORAN, що пов'язано із залученням повітря до суміші. Тобто склади бетонів були пропорційно перераховані з врахуванням зростання їх пористості та зниження середньої густини. Кількість піску визначалася також з

врахуванням об'єму залученого повітря, а також в врахуванням наявності дисперсної арматури у складі.

Таблиця 3.1

Склади досліджених на першому етапі роботи  
бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів

Серія складів	№ складу	Цемент (кг/м <sup>3</sup> )	Щебінь (кг/м <sup>3</sup> )	Пісок (кг/м <sup>3</sup> )	STACHEMENT 2570/5/G (кг/м <sup>3</sup> )	BAUCON®-bazalt (кг/м <sup>3</sup> )	MICROPORAN (кг/м <sup>3</sup> )	Вода (л/м <sup>3</sup> )
без повітровтягуючої добавки	1	350	1205	775	2,10	0	0	135
	2			774		0,50		136
	3			774		0,75		136
	4			774		1,00		136
0,05% повітровтягуючої добавки	5	343	1185	764	2,05	0	0,171	127
	6			763		0,50		128
	7			763		0,75		128
	8			763		1,00		128
0,15% повітровтягуючої добавки	9	336	1160	740	2,02	0	0,505	125
	10			739		0,50		126
	11			739		0,75		126
	12			739		1,00		126

### 3.2 Властивості бетонних і фібробетонних сумішей

Як відмічено вище, виходячи з умов експерименту всі суміші мали рівну рухомість з ОК 2..4 см. Визначені в результаті експериментального підбору складів В/Ц бетонних і фібробетонних сумішей наведені у таблиці 3.2 та на діаграмі 3.1. У таблиці 3.1 зазначена визначена кількість води у складі кожного з експериментальних складів. Аналіз діаграми на рисунку 3.1 і наведених у таблиці 3.1 даних показує, що при використанні дисперсного армування базальтовою фіброю В/Ц сумішей має бути несуттєво збільшено для забезпечення необхідної рухомості.

Таблиця 3.2

#### В/Ц бетонних і фібробетонних сумішей

Серія складів	без повітровтягуючої добавки				0,05% повітровтягуючої добавки				0,15% повітровтягуючої добавки				
	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
В/Ц	0,386	0,389	0,389	0,389	0,370	0,373	0,373	0,373	0,373	0,372	0,375	0,375	0,375

Додаткова кількість води у складі бетонів, яка необхідна для нівелювання ефекту від введення волокон BAUCON®-bazalt у кількості від 0,5 до 1,0 кг/м<sup>3</sup>, складає приблизно 1 кг/м<sup>3</sup>, тобто В/Ц суміші змінюється в межах 1%.

Застосування повітровтягуючої добавки MICROPORAN більш суттєво впливає на властивості суміші. Як відомо, повітровтягуючі добавки утворюють в суміші систему повітряних мікропор, за рахунок чого зокрема мають пластифікуючий ефект [117]. Відповідно склади бетонів і фібробетонів, до яких вводилася добавка MICROPORAN (№5-11), характеризувалися на 3,6-4.1% нижчим В/Ц суміші.

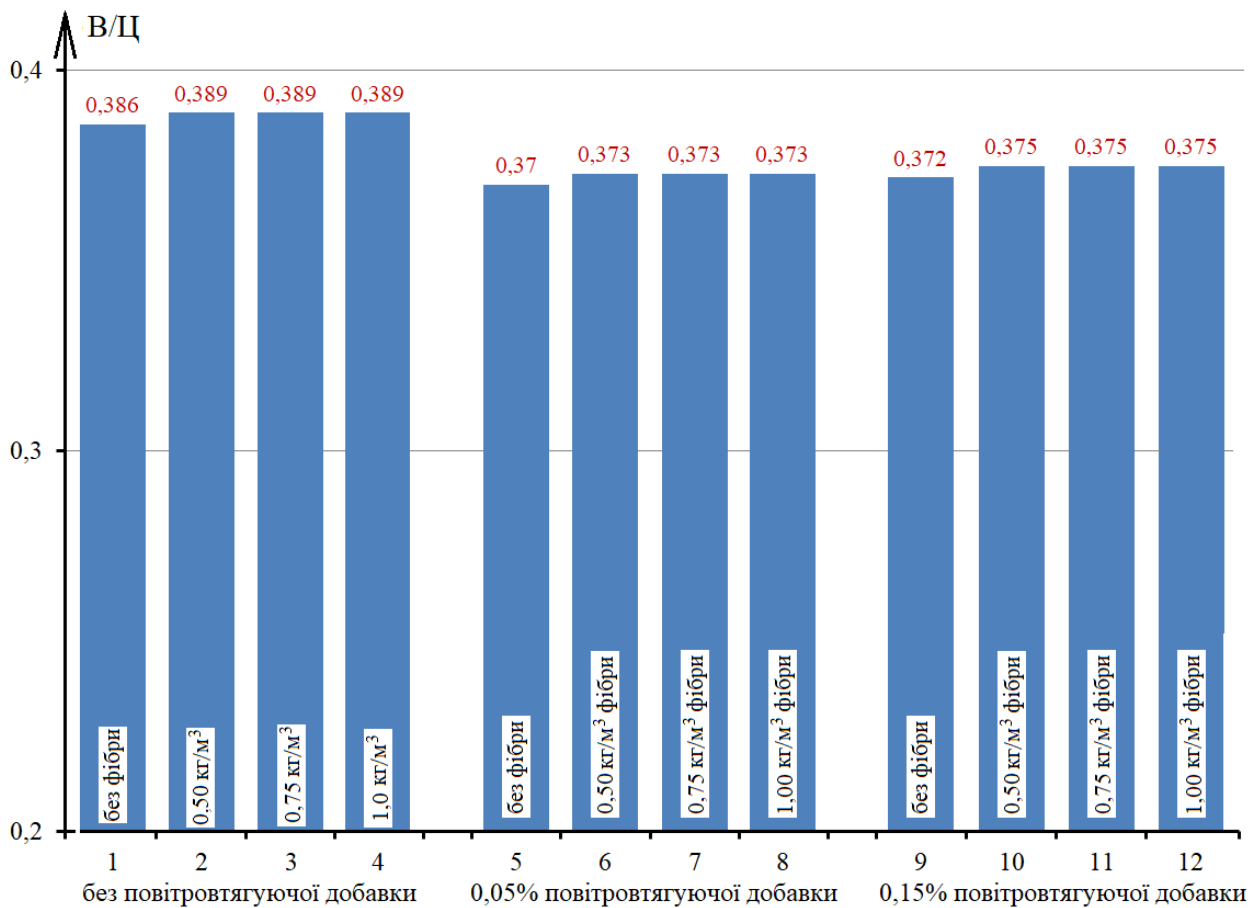


Рис.3.1 В/Ц досліджених бетонних і фібробетонних сумішей

Проте слід розуміти, що основною метою застосування повітрявтягуючої добавки було не пластифікування суміші. Виходячи з мети роботи, ця добавка застосовувалася для залучення до суміші додаткового повітря, що має утворити систему замкнутих пор (мікропор) та відповідно підвищити довговічність матеріалу в умовах заморожування і відтавання [170, 171, 149]. У таблиці 3.3 показано визначений з використанням пороміру UTC-0650 об'єм залученого до бетонних і фібробетонних сумішей повітря для всіх досліджених на даному етапі роботи складів.

За даними таблиці 3.3 було побудовано наведену на рисунку 3.2 діаграму, яка більш наочно відображає експериментально визначений об'єм залученого до бетонних сумішей повітря.



Таблиця 3.3

## Об'єм залученого до бетонних і фібробетонних сумішей повітря (%)

Серія складів	без повітровтягуючої добавки				0,05% повітровтягуючої добавки				0,15% повітровтягуючої добавки			
	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Об'єм	2,0	1,9	2,3	1,9	5,3	4,9	5,4	4,8	10,9	10,2	11,0	10,8

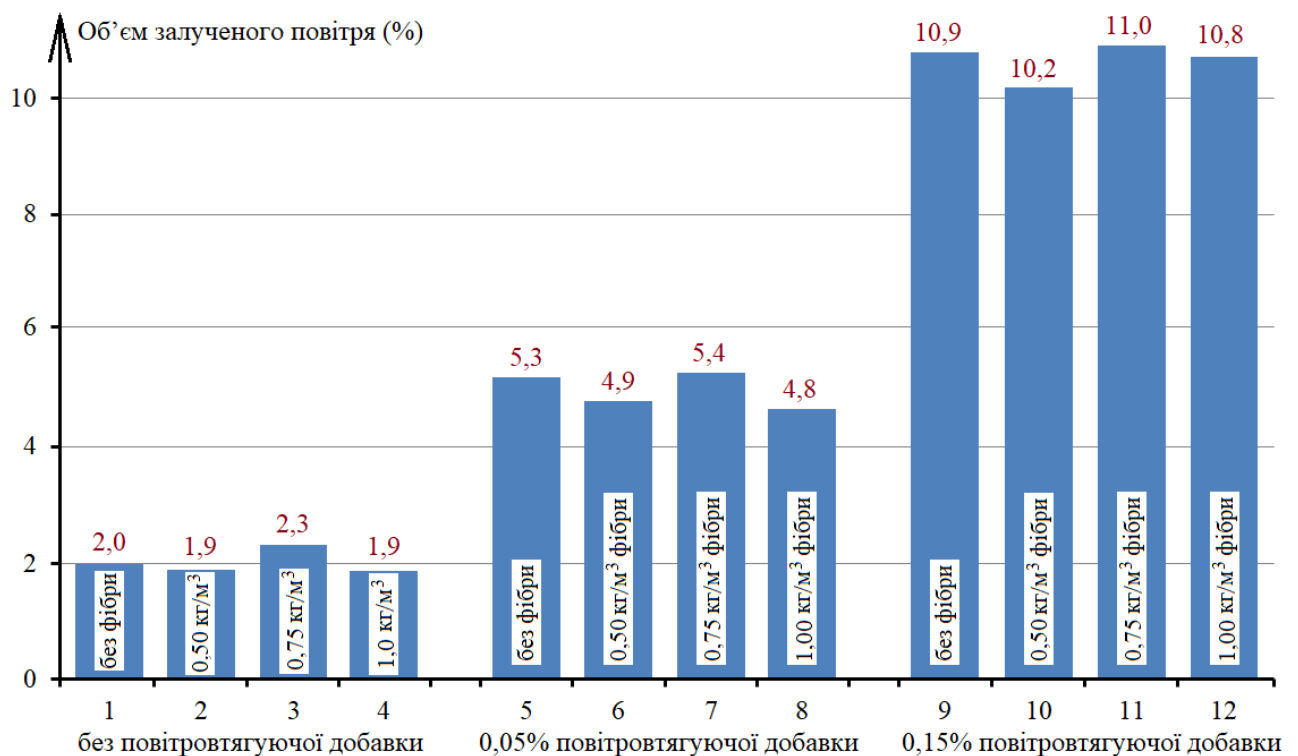


Рис.3.2 Об'єм залученого до бетонних і фібробетонних сумішей повітря

Аналіз наведеної на рисунку 3.2 діаграми показує, що дисперсне армування базальтовою фіброю майже не впливає на кількість залученого до суміші повітря. Проте цей важливий для дорожніх бетонів показник очікувано змінюється при використанні повітровтягуючої добавки.

В партії бетонів і фібробетонів без повітровтягуючої добавки (склади №1–№4) залучення повітря було в межах 1,9–2,3%. При використанні 0,05%

добавки MICROPORAN (склади №5–№8) – від 4,8 до 5,4%. При використанні 0,15% добавки (склади №9–№12) – від 10,2 до 11,0%.

Таким чином повітровтягуюча добавка суттєво вплинула на властивості суміші, що очікувано впливає на структуру і властивості бетонів на їх основі. З одного боку цей вплив обумовлений тим, що за рахунок додаткового залученого повітря змінюється щільність структури композиту, іншого боку – утворюється «резервна» закрита пористість та знижується В/Ц суміші. Тобто повітровтягуюча добавка суттєво впливає на капілярно-пористу структуру бетонів дорожніх покриттів [113, 190].

### 3.3 Середня густина та міцність бетонів і фібробетонів

Для всіх досліджених на даному етапі роботи бетонів і фібробетонів визначалася їх середня густина, міцність на стиск і міцність на розтяг при згині. (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4

Середня густина і міцність досліджених бетонів і фібробетонів

Серія складів	№ складу	Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Міцність на стиск, МПа	Міцність на розтяг при згині, МПа
без повітровтягуючої добавки	1	2440	51,0	6,33
	2	2463	60,4	6,83
	3	2463	63,0	6,97
	4	2450	63,2	7,63
0,05% повітровтягуючої добавки	5	2401	50,0	5,83
	6	2408	52,8	6,03
	7	2430	52,9	6,97
	8	2427	56,8	7,50

## Продовження таблиці 3.4

Серія складів	№ складу	Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Міцність на стиск, МПа	Міцність на розтяг при згині, МПа
0,15% повітровтягуючої добавки	9	2320	46,3	6,03
	10	2351	50,2	7,01
	11	2330	52,1	7,16
	12	2334	52,4	7,66

За наведеними у таблиці 3.4 даними була побудована показана на рисунку 3.3 діаграма, що відображає вплив кількості повітровтягуючої добавки MICROPORAN і базальтової фібри на середню густину досліджених бетонів і фібробетонів.

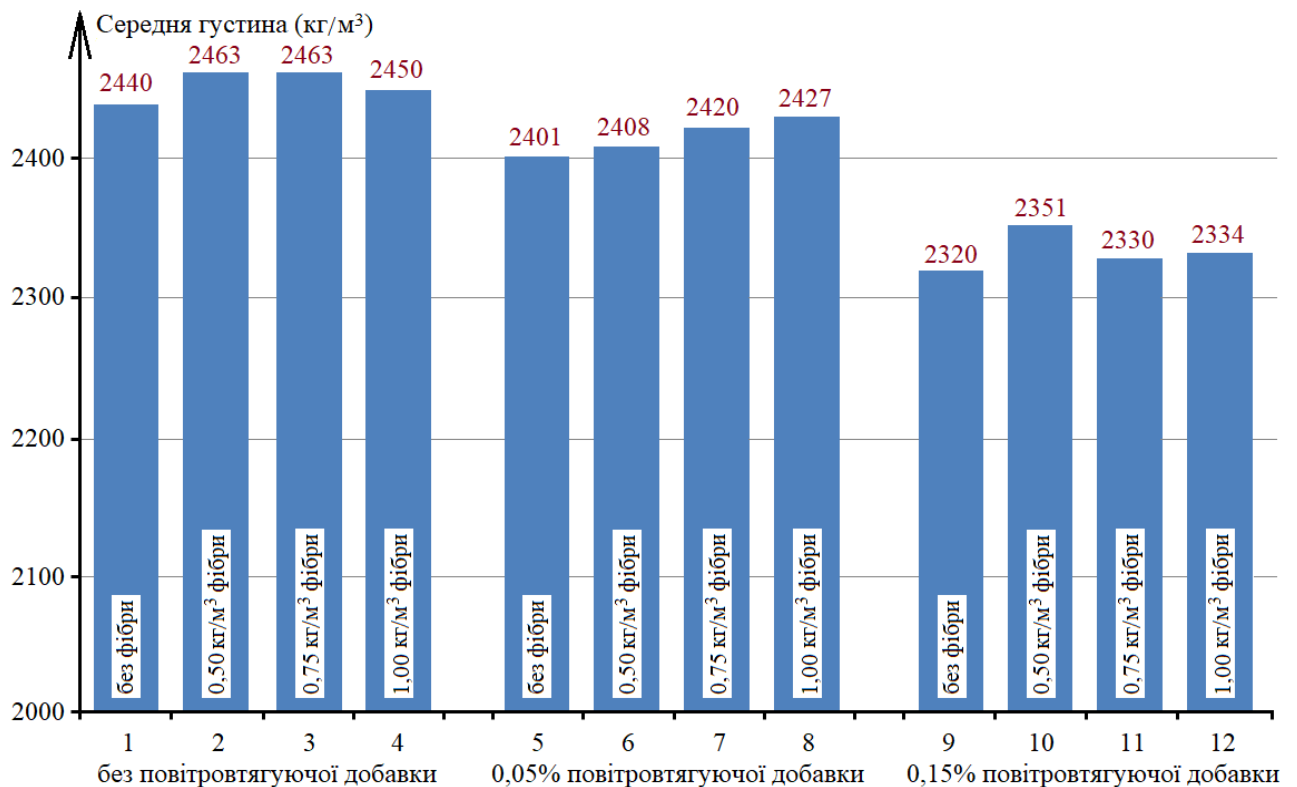


Рис.3.3 Середня густина досліджених бетонів і фібробетонів

Як видно з діаграми, вміст повітря у бетонній суміші впливав на всі властивості бетонів, при цьому найбільш виражено на середню густину матеріалу [149]. Відповідно середня густина досліджених бетонів і фібробетонів залежала переважно від кількості повітровтягуючої добавки. При використанні MICROPORAN у кількості 0,05% від маси цементу середня густина бетонів знижується приблизно на 1,5% у порівнянні з бетонами без повітровтягуючої добавки (з 2440-2460 кг/м<sup>3</sup> до 2401-2430 кг/м<sup>3</sup>), при використанні MICROPORAN у кількості 0,15% – приблизно на 4,8% (до 2320-2351 кг/м<sup>3</sup>).

При введенні до складу досліджених бетонів базальтової фібри BAUCON®-bazalt їх середня густина несуттєво зростала (на 7-31 кг/м<sup>3</sup>, тобто на 0,3-1,2%). При цьому при зміні кількості фібри середня густина фібробетонів змінювалася несуттєво. В цілому такий ефект можна пояснити особливістю корегування складу бетонів при використанні дисперсного армування (таблиця 3.1).

Важливо відзначити, що в багатьох дослідженнях показано, що значення об'єму залученого повітря в суміші безпосередньо після його приготування та після ущільнення може суттєво відрізнятись [133,172,173]. З врахуванням цього можна зробити припущення, що зміна середньої густини бетону відображає зміну фактичної кількості додатково залученого до бетонної суміші повітря. Тобто вона є близькою до того об'єму повітря, що залишилося в матеріалі після ущільнення суміші.

З врахуванням даного припущення можна зробити висновок, що при використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,15% фактично до складу бетону залучено додатково об'єм повітря, який є близьким до значення зниження середньої густини матеріалу у відсотках, тобто приблизно 5%. Це значення об'єму є близьким до раціонального [149]. Проте утворення «резервної» пористості впливає не лише на здатності бетону опиратися впливам заморожування і відтавання, а і на решту його механічних показників, насамперед на міцність.

Відомо, що бетони жорстких дорожніх покриттів мають забезпечувати необхідний для заданої категорії автомобільної дороги рівень міцності на стиск. Зокрема міцність регламентується вимогами ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» [169] та ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування» [12]. Міцність на стиск в значній мірі обумовлює модуль пружності бетону та відповідно його роботу в конструкції дорожнього одягу.

За наведеними у таблиці 3.4 даними була побудована показана на рисунку 3.4 діаграма, яка відображає рівень міцності на стиск досліджених бетонів і фібробетонів.

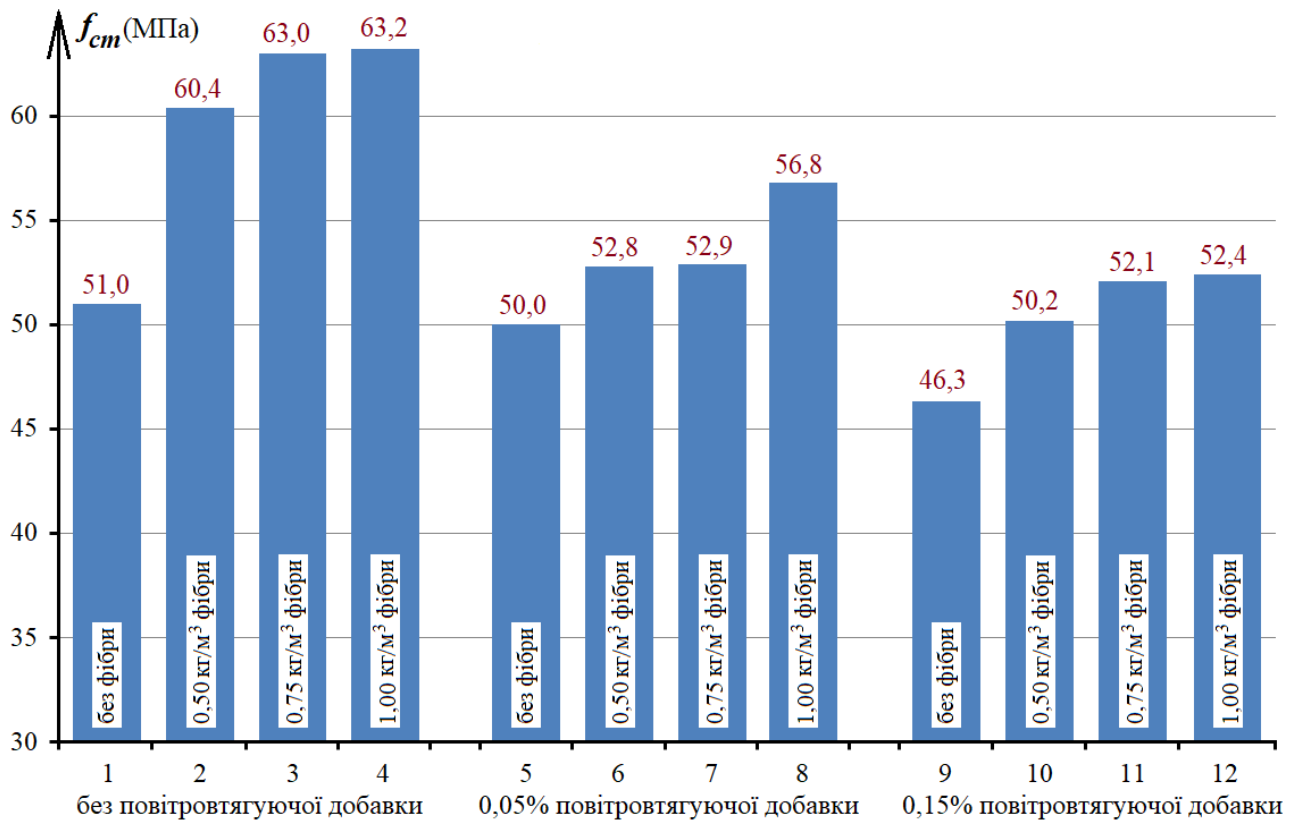


Рис.3.4 Міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів

Аналіз діаграми показує, що на міцність досліджених на даному етапі роботи бетонів суттєво впливає як введення базальтової фібри BAUCON®-bazalt так застосування повітровтягуючої добавки. За рахунок дисперсного армування у кількості 0,75-1,00 кг/м³ міцність на стиск бетонів без добавки

MICROPORAN зростає на величину до 12,2 МПа, тобто на 24%. При введенні аналогічної кількості базальтової фібри у бетони з вмістом добавки MICROPORAN 0,05% міцність на стиск підвищується на величину до 6,8 МПа (на 14%). Для бетонів з вмістом добавки MICROPORAN 0,15% дисперсне армування базальтовою фіброю підвищує міцність на стиск на величину до 6,1 МПа, тобто на 13%.

Введення повітровтягуючої добавки викликає зниження міцності бетону на стиск на 2-16% при використанні 0,05% MICROPORAN і на 9-21% при використанні 0,15% MICROPORAN. Даний ефект є відомим у будівельному матеріалознавстві і він пояснюється насамперед зниженням середньої густини матеріалу [149,173-176]. Тобто структура бетонів є менш щільною. Залучене за рахунок застосування добавки повітря утворює додаткові пори, які впливають на побудову матриці бетону як композиційного матеріалу. Також в залежності від методу розрахунку складу бетону це може викликати фактичне зменшення витрати цементу на 1 м<sup>3</sup> суміші, яке відбувається виходячи з витрати компонентів на однаковий об'єм бетону. Проте справедливо зазначити, що ця витрата може бути скорегована при підборі складу бетону.

Як відмічалось вище, в експериментальних дослідженнях даного першого етапу роботи контролювалася міцність бетону як на стиск, так і на розтяг при згині. Відомо, що для бетонів дорожніх покриттів міцність на розтяг при згині є більш важливим показником, ніж міцність на стиск. На цей показник якості, а точніше на клас за міцністю на розтяг при згині  $V_{btb}$  одночасно зі значенням модуля пружності бетону спирається розрахунок конструкції дорожнього одягу з жорстким покриттям згідно ГБН В.2.3-37641918-557:2016 [12].

На рисунку 3.5 показана побудована за даними таблиці 3.4 діаграма, яка відображає рівень міцності досліджених бетонів і фібробетонів на розтяг при згині ( $f_{c,tf}$ ).

Як видно з діаграми, дисперсне армування оказує на міцність на розтяг при згині досліджених на даному етапі роботи бетонів більш відчутний позитивний вплив, ніж на величину їх міцності на стиск. При введенні базальтового

волокна BAUCON®-bazalt у кількості  $1 \text{ кг/м}^3$  для бетонів без добавки MICROPORAN величина  $f_{c,tf}$  зростає на 1,3 МПа, тобто на 21%. Для бетонів модифікованих добавкою MICROPORAN у кількості 0,05% введення  $1 \text{ кг/м}^3$  базальтової фібри підвищує міцність на розтяг при згині на 1,7 МПа (29%). Міцність бетонів з 0,15% MICROPORAN з рахунок дисперсного армування зростає на 1,6 МПа, що дорівнює 27%.

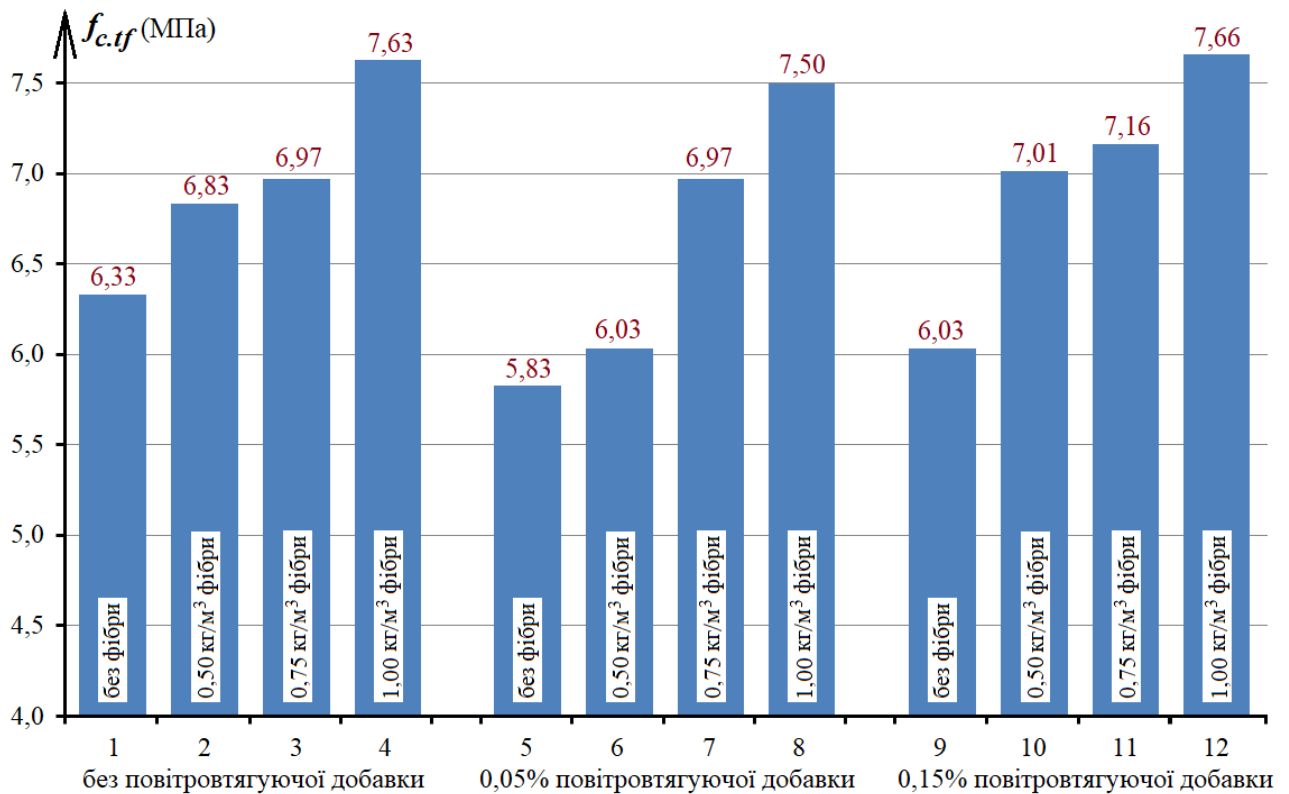


Рис.3.5 Міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів

Важливо зазначити, що введення добавки MICROPORAN майже не впливає на міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів, незважаючи на зміну їх середньої густину та деяке фактичне зменшення кількості в'язучого у складі. Як видно з діаграми на рисунку 3.5, при однаковій кількості базальтової фібри у складі міцність на розтяг при згині бетонів без повітровтягуючої добавки та з 0,05% або 0,15% добавки MICROPORAN є приблизно рівною. Тобто використання повітровтягуючої добавки дозволяє отримати бетони з необхідним рівнем міцність на розтяг при фактично дещо

меншій витраті в'язучого. Крім того використання повітровтягуючої добавки забезпечує необхідну довговічність бетонів в умовах заморожування і відтавання.

В цілому можна зробити висновок про те, що як показано у даному підрозділі, дисперсне армування дозволяє підвищити міцність бетону дорожнього покриття на розтяг при згині та одночасно на стиск, а використання повітровтягуючої добавки дає неоднозначний ефект. При цьому технологічно важливим є те, що ефективність використання фібри є більш стабільної і комплексною, що показано нижче.

### **3.4 Вплив дисперсного армування і повітровтягуючої добавки на стиранисть і морозостійкість бетонів**

Відомо, що для бетонів жорстких дорожніх покриттів важливим показником якості є їх зносостійкість. Вона визначається за рівнем стиранисті матеріалу і в значній мірі обумовлює довговічність бетону в умовах динамічних впливів від транспорту, насамперед від стираючої дії коліс [170,58]. На даному етапі роботи стиранисть визначалася для всіх досліджених бетонів і фібробетонів (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5

Стиранисть досліджених бетонів і фібробетонів G (г/см<sup>2</sup>)

Серія складів	без повітровтягуючої добавки				0,05% повітровтягуючої добавки				0,15% повітровтягуючої добавки			
	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
G	0,46	0,43	0,42	0,39	0,47	0,44	0,44	0,4	0,49	0,45	0,43	0,41



На рисунку 3.6 наведено діаграму, яка побудована за даними таблиці 3.5 та яка відображає вплив кількості базальтової фібри і повітровтягуючої добавки MICROPORAN на стиранисть досліджених бетонів і фібробетонів.

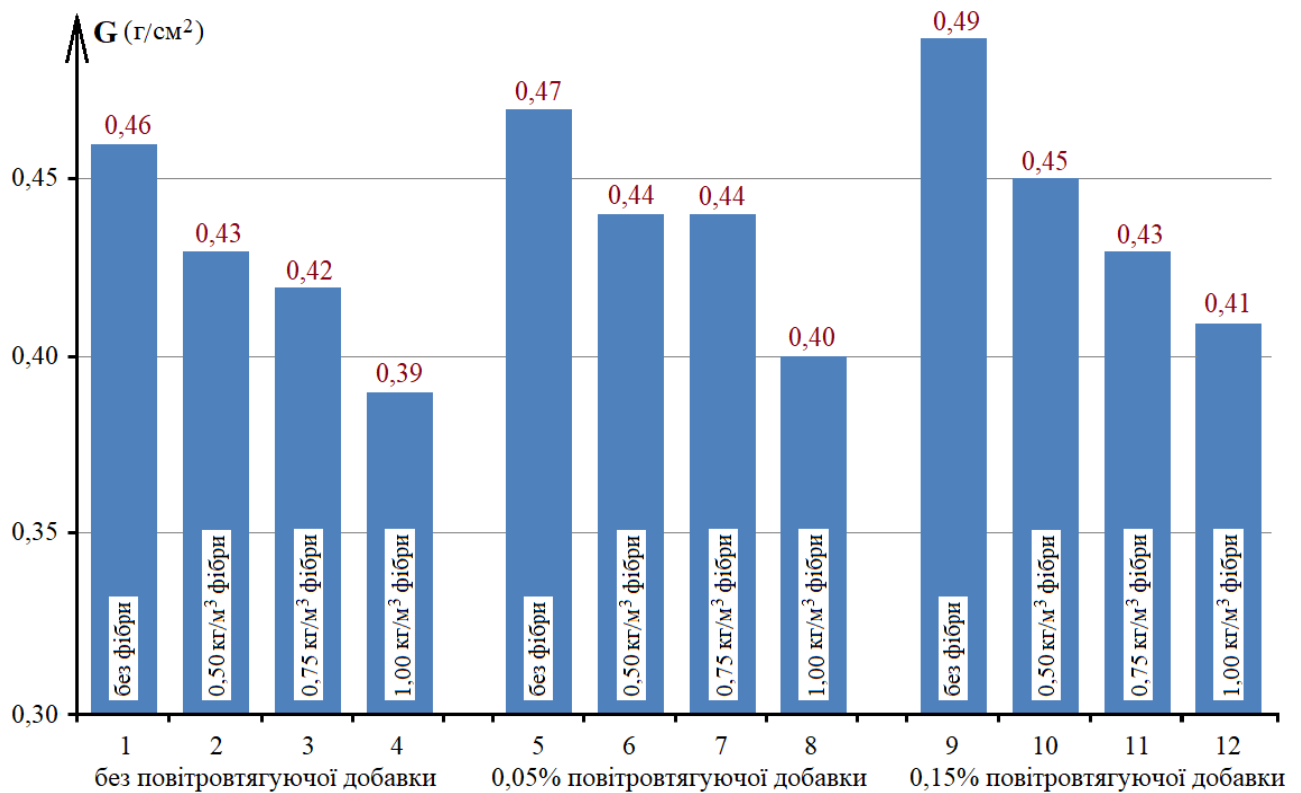


Рис.3.6 Стиранність досліджених бетонів і фібробетонів

Аналіз діаграми на рисунку 3.6 дозволяє зробити висновок, що при застосуванні повітровтягуючої добавки MICROPORAN стиранисть бетону підвищується на 2-7%, тобто зносостійкість матеріалу несуттєво знижується. Цей ефект пояснюється зменшенням середньої густини та відповідно міцності бетону, що впливає на стійкість до руйнування окремих блоків структури композиційного матеріалу при стиранні поверхні зразків [145].

При цьому дисперсне армування фіброю позитивно впливає на зносостійкість бетону. За рахунок введення базальтового волокна у кількості 0,75-1,0 кг/м³ стиранисть бетону знижується на 14-15%, що відповідно сприяє підвищенню довговічності жорсткого дорожнього покриття. Даний ефект пояснюється здатністю дисперсної арматури утримувати окремі структурні

блоки бетону як композиційного матеріалу при динамічних впливах, що широко описано в дослідженнях багатьох вчених [170,101,177].

В цілому можна зробити висновок, що для всіх досліджених бетонів і фібробетонів стиранисть була на рівні 0,39-0,49 г/см<sup>2</sup>. За даними [178] у дорожньому будівництві рекомендується використовувати бетони з рівнем стиранисті не вище 0,50 г/см<sup>2</sup>. Всі бетони і фібробетони відповідали такій вимозі, при цьому за рахунок дисперсного армування базальтовою фіброю стиранисть суттєво знижувалася, тобто підвищувалася зносостійкість бетонів в типових для дорожніх покриттів умовах експлуатації.

Як показано у розділі 1, морозостійкість є одним з основних фізико-механічних показників, що обумовлює довговічність бетонів жорстких дорожніх покриттів в типових для України кліматичних умовах. Верхній шар дорожнього покриття в холодну пору року може піддаватися декільком циклам періодичного заморожування і відтавання за добу за рахунок впливу температури шин автомобільного транспорту.

Визначені на даному першому етапі роботи показники морозостійкості досліджених бетонів і фібробетонів наведені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

## Морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів (циклів)

Серія складів	без повітровтягуючої добавки				0,05% повітровтягуючої добавки				0,15% повітровтягуючої добавки				
	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
морозостійкість	F200	F300	F300	F300	F200	F200	F200	F300	F300	F300	F300	F300	F300

Аналіз наведених у таблиці 3.6 даних показує, що морозостійкість всіх досліджених бетонів і фібробетонів була забезпечена на високому рівні – від F200 до F300. Досягти цього рівня морозостійкості дозволило використання портландцементу ПЦ І-500 Р-Н (тобто з малим вмістом мінеральних добавок),

ефективного суперпластифікатора STACHEMENT 2570/5/G та якісних митих заповнювачів. За рахунок використання таких компонентів В/Ц сумішей, як показано вище, було в діапазоні від 0,37 до 0,39.

Необхідно зауважити, що в даних дослідженнях точність визначення фактичного рівня морозостійкості бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів була суттєво обмеженою. Це пов'язано з тим, що застосування найбільш точних методів визначення морозостійкості бетонів вимагає надто багато часу для проведення експериментального дослідження. Крім того не прискорені методи (більш точні) є трудомісткими та потребують більшої кількості обладнання. Відповідно в даній роботі як і в більшості практичних випадків використовувався прискорений (третій) метод визначення рівня F згідно з ДСТУ Б В.2.7-49-96 «Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні», а саме метод при заморожуванні та відтаванні у солоній воді при температури заморожування мінус 50°C [155]. Проте для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів даний прискорений метод визначення морозостійкості розрізняє тільки марки F100, F150, F200, F300 і так далі. Така дискретність не заважає оцінити загальний вплив від застосування базальтової дисперсної арматури і повітровтягуючої добавки на морозостійкість бетону, але не дозволяє визначити марку за морозостійкістю в діапазоні між F200 і F300, тобто F250.

Фото зразку бетону (склад №9) після проведення 20 циклів заморожування і відтавання у солоній воді згідно методики ДСТУ Б В.2.7-49-96 наведено на рисунку 3.7.

Відповідно аналіз наведених у таблиці 3.6 даних дозволяє зробити висновок, що застосування базальтової фібри позитивно впливає на морозостійкість бетону. Склад бетону №1 без дисперсного армування мав морозостійкість F200, а при застосуванні фібри незалежно від її кількості (склади №2-4) рівень морозостійкості фібробетонів складав F300.



Рис.3.7 Вигляд зразку бетону після проведення 20 циклів заморожування у відтавання у солоній воді згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96

При використанні базальтової фібри одночасно з повітровтягуючої добавкою ефективність дисперсного армування в підвищенні рівня  $F$  є дещо меншою. Позитивний вплив від введення фібри при її одночасному використанні з MICROPORAN виявлено тільки для складу №8. У даному складі фібробетону за рахунок використання  $1 \text{ кг/м}^3$  дисперсної арматури морозостійкість зростає в порівнянні з бетонами складу №5 і фібробетонами складів №6 і №7. Цей ефект можна пояснити тим, що капілярно-порова структура має більший вплив на стійкість бетону як композиційного матеріалу до заморожування та відтавання, ніж наявність дисперсної арматури [175].

В межах досліджених в експерименті складів бетонів вплив повітровтягуючої добавки на морозостійкість суттєво змінюється в залежності від її кількості у складі. При використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,05% від маси цементу морозостійкість бетонів і фібробетонів знижується до  $F_{200}$  при кількості фібри до  $0,75 \text{ кг/м}^3$  (склади №5-7). Але при підвищенні кількості добавки MICROPORAN до 0,15% морозостійкість фібробетону

зростає до рівня F300. Також важливо відзначити, що бетон без фібри, тобто склад №9, також має морозостійкість на рівні F300. Це свідчить про те, що бетони з раціональною кількістю добавки MICROPORAN забезпечують високу морозостійкість за фактично дещо меншій кількості цементу на 1 м<sup>3</sup> бетону. Ефект позитивного впливу саме такої кількості повітровтягуючої добавки, тобто 0,15% від маси цементу, можна пояснити тим, що фактичний об'єм залученого до бетону повітря безпосередньо після приготування бетонної суміші та після її ущільнення суттєво відрізняється [31,133,172,173]. Цю різницю важко прорахувати, але можна визначити експериментально. Відповідно як обґрунтовано у п.3.2, у даному випадку для складів № 9-12 фактичний об'єм залученого повітря становив 5-7%, що є близьким до раціонального [169,170,173,179]. Раціональна кількість залученого до суміші повітря позитивно впливає на морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів.

В цілому можна зробити висновок, що за рахунок використання дисперсного армування базальтовою фіброю з довжиною волокон 12 мм і діаметром 18 мкм, а також комплексного модифікування бетону суперпластифікатором полікарбосилатного типу STACHEMENT 2570/5/G та повітровтягуючою добавкою MICROPORAN отримано фібробетони жорсткого дорожнього покриття з підвищеною довговічністю при збереженні необхідного рівня міцності. Застосування такого модифікованого фібробетону можна визнати економічно доцільним, тому що при несуттєвому збільшенні собівартості матеріалу підвищується його довговічність, що сприяє зниженню витрат на утримання доріг за рахунок подовження міжремонтних періодів. Також важливо наголосити, що в даному дослідженні при розробці складів бетонів і фібробетонів використовувалися лише вітчизняні компоненти (в'язуче, заповнювачі, модифікатори і фібра). Це важливо з врахуванням значних обсягів дорожніх робіт, яким необхідно буде виконувати у процесі післявоєнного відновлення країни.

Проте ефективність застосування повітровтягуючої добавки для досліджених бетонів і фібробетонів виявилася обмеженою. При залученні додаткового повітря до бетонної суміші та відповідно зростанні резервної пористості матеріалу морозостійкість бетону збільшується, але одночасно дещо знижується його міцність та зносостійкість. Натомість застосування дисперсного армування базальтовою фіброю забезпечує комплексний позитивний ефект – зростає міцність бетону, насамперед міцність на розтяг при згині, та за рахунок підвищення морозостійкості та зносостійкості забезпечується краща довговічність матеріалу.

### **Висновки за 3-м розділом**

1. При використанні дисперсного армування базальтовою фіброю В/Ц сумішей несуттєво (на 1%) підвищується для забезпечення необхідної рухомості. Бетонні та фібробетонні суміші, до яких вводилася добавка MICROPORAN, характеризувалися на 3,6-4.1% нижчим В/Ц.

2. Встановлено, що дисперсне армування базальтовою фіброю оказує комплексний позитивний вплив на міцність і довговічність бетону жорсткого дорожнього покриття. При використанні волокна BAUCON®-bazalt у кількості 0,75-1 кг/м<sup>3</sup> міцність бетону на стиск підвищується на 13-24%, міцність на розтяг при згині зростає на 21-29%, морозостійкість підвищується на рівень до 100 циклів. Також дисперсне армування на 14-15% знижує стиранисть бетону, тобто підвищує його зносостійкість.

3. Завдяки використанню дисперсного армування базальтовою фіброю а також комплексній модифікації суперпластифікатором STACHEMENT 2570/5/G отримано фібробетони жорстких дорожніх покриттів з міцністю на стиск до 63,2 МПа, міцністю на розтяг при згині до 7,66 МПа та підвищеною довговічністю.

4. При застосуванні повітровтягуючої добавки MICROPORAN середня густина досліджених бетонів і фібробетонів зменшується на 1,9-5,4%. За рахунок зменшення середньої густини міцність на стиск бетонів знижується на 2-21%, також на 2-7% підвищується їх стиранисть (знижується зносостійкість). При цьому кількості повітровтягуючої добавки майже не впливає на міцність бетонів на розтяг при згині.

5. При використанні повітровтягуючої добавки у кількості 0,05% від маси цементу морозостійкість бетонів і фібробетонів не змінюється або навіть дещо знижується. При використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,15% для бетону без дисперсного армування марка за морозостійкістю підвищується від F200 до F300. Тобто застосування повітровтягуючої добавки для досліджених бетонів і фібробетонів має обмежену ефективність. При залученні додаткового повітря до бетонної суміші морозостійкість бетону збільшується, але одночасно знижується його міцність та зносостійкість. Натомість застосування дисперсного армування базальтовою фіброю забезпечує комплексний позитивний ефект – зростає міцність, морозостійкість та зносостійкість бетону.

6. Викладені у даному розділі результати досліджень були опубліковані у роботах [181-184].

## РОЗДІЛ 4

### ВЛАСТИВОСТІ ФІБРОБЕТОНІВ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

Як було зазначено вище (п.2.1) на другому етапі роботи проводилися дослідження структури і властивостей фібробетонів дорожніх покриттів і транспортних споруд.

В дослідженнях, проведених на даному етапі роботи, використовувалися методи планування експерименту та експериментально-статистичного моделювання. Експеримент проводився за оптимальним 15-ти точковим симетричним 3-х факторним планом. Варіювалися такі фактори складу: кількість портландцементу ( $X_1$ , від 290 до 350 кг/м<sup>3</sup>), базальтової фібри ( $X_2$ , від 0,9 до 1,5 кг/м<sup>3</sup>) і суперпластифікатору ( $X_3$ , від 0,6 до 1% від маси цементу).

План експерименту другого етапу досліджень і складу досліджених фібробетонів наведені у таблиці 2.5.

#### **4.1 Вплив складу фібробетону на В/Ц сумішей рівної рухомості**

Суміші всіх досліджених на даному етапі роботи фібробетонів мали рівну рухомість  $S_1$  при ОК = 2..3 см, що досягалося підбором кількості води з відповідним корегуванням складу бетону. Така рухомість суміші була обрана згідно вимогам ДБН В.2.3-4:2015 [169]. Даний ДБН регламентує саме таку рухомість при застосуванні технології влаштування покриття з використанням бетоноукладача з ковзною опалубкою. Така технологія є найбільш розповсюдженою в наш час при будівництві доріг з жорсткими покриттями, а також жорстких аеродромних покриттів.

Відповідно В/Ц сумішей залежало від їх складу (таблиця 4.1).



Таблиця 4.1

## В/Ц досліджених фібробетонних складів рівної рухомості

№ точки	В/Ц	№ точки	В/Ц	№ точки	В/Ц
1	0,434	6	0,416	11	0,417
2	0,421	7	0,425	12	0,403
3	0,431	8	0,419	13	0,409
4	0,438	9	0,416	14	0,420
5	0,428	10	0,419	15	0,411

Експериментально-статистична (ЕС) модель [164,165], що описує вплив варійованих факторів складу на В/Ц сумішей має вигляд (4.1):

$$\begin{aligned}
 \text{В/Ц} = & 0,418 - 0,009x_1 + 0,002x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & + 0,003x_2 - 0,001x_2^2 + 0,001x_2x_3 \\
 & - 0,006x_3 + 0,001x_3^2
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Поле властивостей [165] даної ЕС-моделі показує мінімальне значення  $\text{В/Ц}_{\min} = 0,403$  у точці з координатами  $x_1 = x_3 = 1$ ,  $x_2 = -1$ , тобто при максимальній кількості цементу і суперпластифікатору, та при мінімальній кількості базальтової фібри. Максимальне  $\text{В/Ц}_{\max} = 0,438$  спостерігається у точці з координатами  $x_1 = x_3 = -1$ ,  $x_2 \approx 1$ , тобто при мінімальній кількості цементу і добавки STACHEMENT 2570/5/G, та при введенні максимальної кількості фібри.

За ЕС-моделлю (4.1) були побудовані однофакторні діаграми, які відображають вплив варійованих факторів на В/Ц сумішей в зонах екстремумів (рис.4.1). Побудова діаграм здійснювалася у програмі Comrex таким чином, що лінії на кожній з них проходять через максимальне (червоні лінії) та мінімальне (сині лінії) значення В/Ц [164,165,168]. При такій побудові рівні двох не відображених на кожній з діаграм факторів фіксувалися на значеннях, які

забезпечують відповідно максимальне і мінімальне значення В/Ц фіробетонної суміші (зона екстремумів).

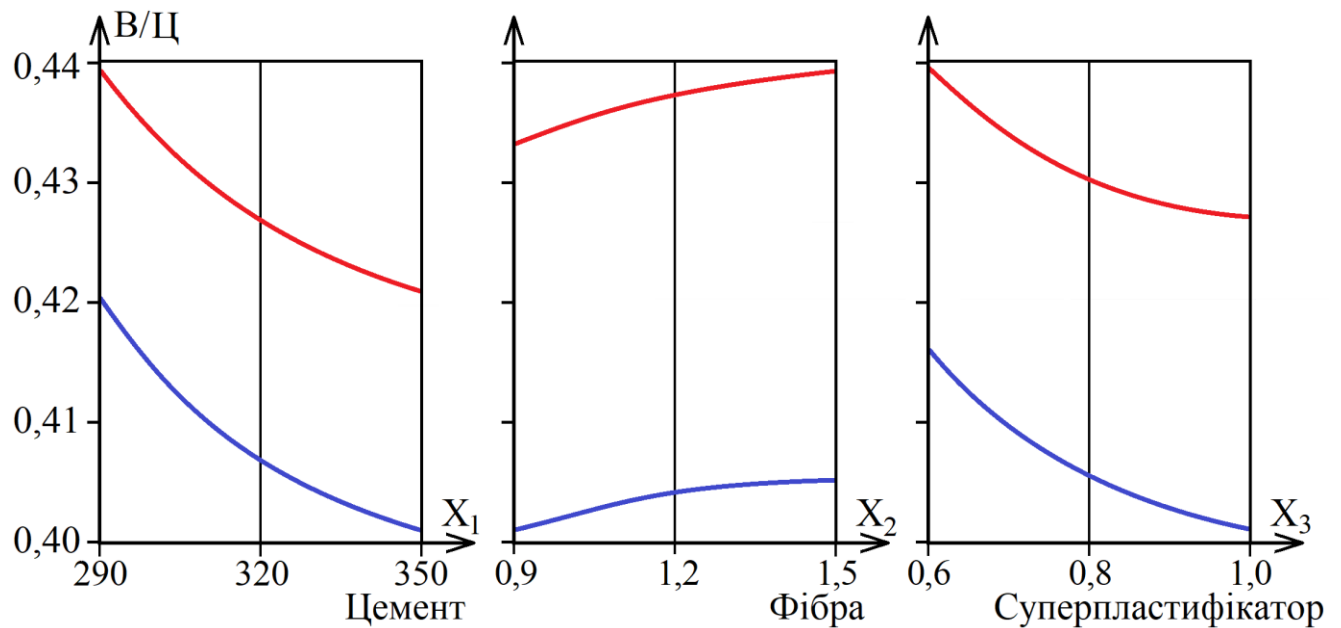


Рис.4.1 Вплив варійованих факторів складу на В/Ц сумішей рівної рухомості в зонах екстремумів

Як видно на наведеній на рисунку 4.1 діаграмі, у межах факторного простору експерименту В/Ц фіробетонних сумішей змінюється в не дуже великих межах – до 10%.

Для більш детального аналізу впливу варійованих факторів на В/Ц, зокрема з врахуванням їх взаємодії, була побудована показана на рисунку 4.2 діаграма у вигляді кубу.

Як можна побачити на даній діаграмі, при збільшенні у складі фіробетону кількості портландцементу В/Ц бетонної суміші рівної рухомості очікувано знижується. За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору з 0,6 до 1,0% від маси цементу В/Ц суміші знижується, проте дане зниження не є значним – в середньому на 3%. Це пояснюється тим, що вже при дозуванні добавка STACHEMENT 2570/5/G у кількості 0,6% є досить ефективною, що показано у попередньому розділі та у роботах [180,181]. Також з діаграм на рисунку 4.1 і рисунку 4.2 видно, що зростання кількості суперпластифікатору з

0,9 до 1% не знижує В/Ц суміші. Тобто раціональною кількістю даної добавки полікарбоксилатного типу є 0,8-0,9% від маси цементу.

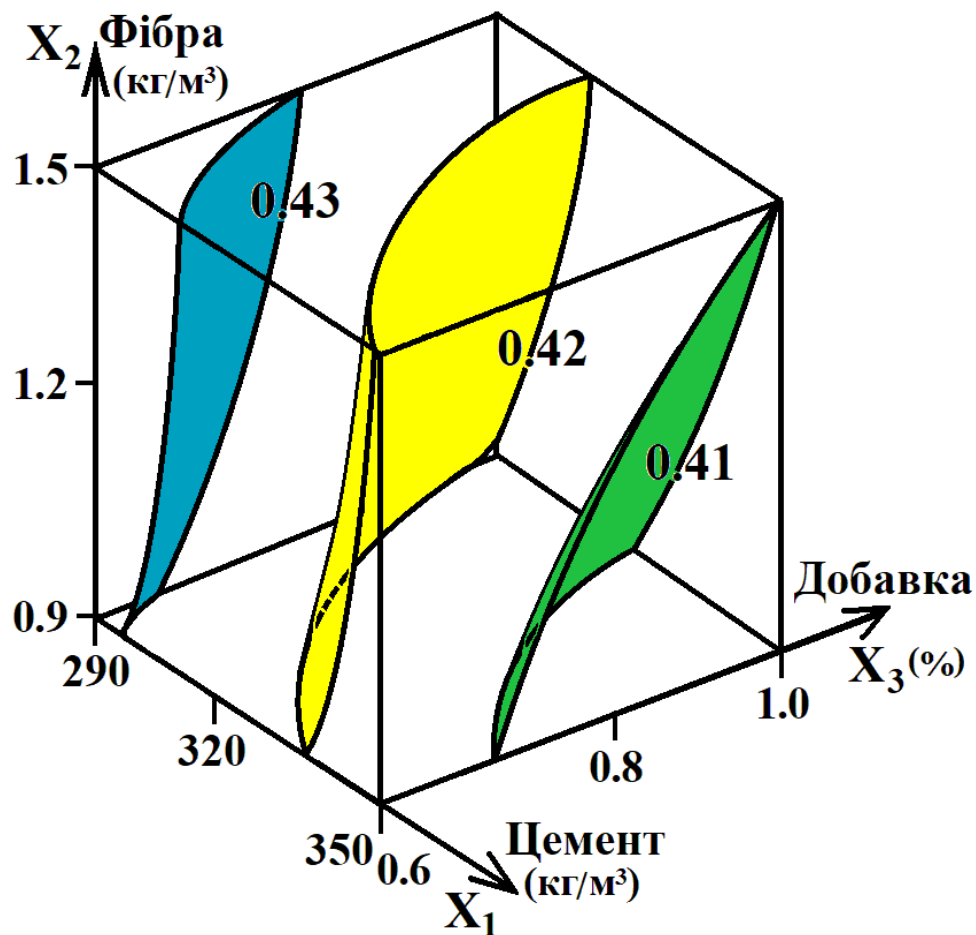


Рис.4.2 Вплив варійованих факторів складу на В/Ц сумішей рівної рухомості

При підвищенні кількості базальтової фібри BAUCON®-bazalt від 0,9 до 1,5 кг/м<sup>3</sup>, тобто у межах факторного простору експерименту, В/Ц суміші рівної рухомості практично не змінюється. Навіть застосування максимальної кількості фібри (1,5 кг/м<sup>3</sup>) вимагає підвищення В/Ц суміші в межах 1,5%.

В цілому можна констатувати, що завдяки використанню близької до раціональної кількості добавки суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G В/Ц всіх досліджених фібробетонних сумішей знаходився в прийнятних для бетонів дорожніх покриттів межах, тобто не вище 0,438.

Також при приготуванні фібробетонних сумішей аналогічно першому етапу досліджень контролювалася кількість залученого до сумішей повітря.

Було встановлено, що для всіх 15 досліджених сумішей об'єм залученого повітря знаходився в межах 2,1–2,5%. Тобто варіювання факторів складу в межах факторного простору експерименту майже не впливало на об'єм залученого повітря. В цілому це підтверджує результати першого етапу досліджень, які свідчили про відчутний вплив на даний структурний показник лише кількості повітровтягуючої добавки.

Проте як відмічалось вище, варіювання вмісту повітря в фібробетонних сумішах не було задачею другого етапу досліджень, тому що покращення властивостей та підвищення довговічності фібробетонів жорстких дорожніх покриттів досягалося за рахунок використання раціональної кількості фібри і добавки суперпластифікатору.

## 4.2 Середня густина фібробетонів

На даному другому етапі досліджень аналогічно першому етапу визначалася середня густина фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Як відомо, середня густина може вважатися узагальненим показником щільності структури композиту, проте є мало пов'язаною з побудовою кластерної структури бетону як грубогетерогенного композиту, тобто не відображає побудову сітки технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу [113].

Результати визначення середньої густини (при рівноважній вологості) досліджених фібробетонів у 15 контрольних точках наведені у таблиці 4.2.

За даними, наведеними у таблиці 4.2 була побудована ЕС-модель (4.2), яка описує вплив варійованих факторів складу середню густину фібробетонів:

$$\begin{aligned} \rho \text{ (кг/м}^3\text{)} = & 2451,3 - 3,7x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,5x_1x_3 \\ & - 2,7x_2 - 3,2x_2^2 \quad - 0,5x_2x_3 \\ & + 4,4x_3 - 3,7x_3^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Середня густина досліджених фібробетонів

№ точки	Середня густина (кг/м <sup>3</sup> )	№ точки	Середня густина (кг/м <sup>3</sup> )	№ точки	Середня густина (кг/м <sup>3</sup> )
1	2447	6	2451	11	2437
2	2454	7	2444	12	2450
3	2455	8	2450	13	2448
4	2441	9	2452	14	2434
5	2450	10	2446	15	2441

Для ЕС-моделі (4.2) поле властивостей має мінімальне значення  $\rho_{\min} = 2434 \text{ кг/м}^3$  у точці з координатами  $x_1 = x_2 = 1, x_3 = -1$ , тобто при максимальній кількості цементу і базальтової фібри, та при мінімальній кількості суперпластифікатору. Максимальне значення  $\rho_{\max} = 2457 \text{ кг/м}^3$  спостерігається у точці з координатами  $x_1 = -1, x_2 = -0,45, x_3 = 0,53$ , тобто при мінімальній кількості цементу, кількості фібри BAUCON®-bazalt близько  $1,05 \text{ кг/м}^3$  і кількості добавки STACHEMENT 2570/5/G близько 0,9% від маси цементу.

За ЕС-моделлю (4.2) була побудована показана на рисунку 4.3 діаграма у вигляді кубу, яка відображає вплив варійованих факторів складу на середню густина фібробетонів.

В цілому можна констатувати, що середня густина досліджених на другому етапі роботи фібробетонів змінювалася у межах факторного простору експерименту не так відчутно, як середня густина бетонів і фібробетонів, досліджених на першому етапі роботи (п.3.3). Це обумовлено тим, що на другому етапі роботи не використовувалася повітровтягуюча добавка, яка суттєво впливала на середню густина.

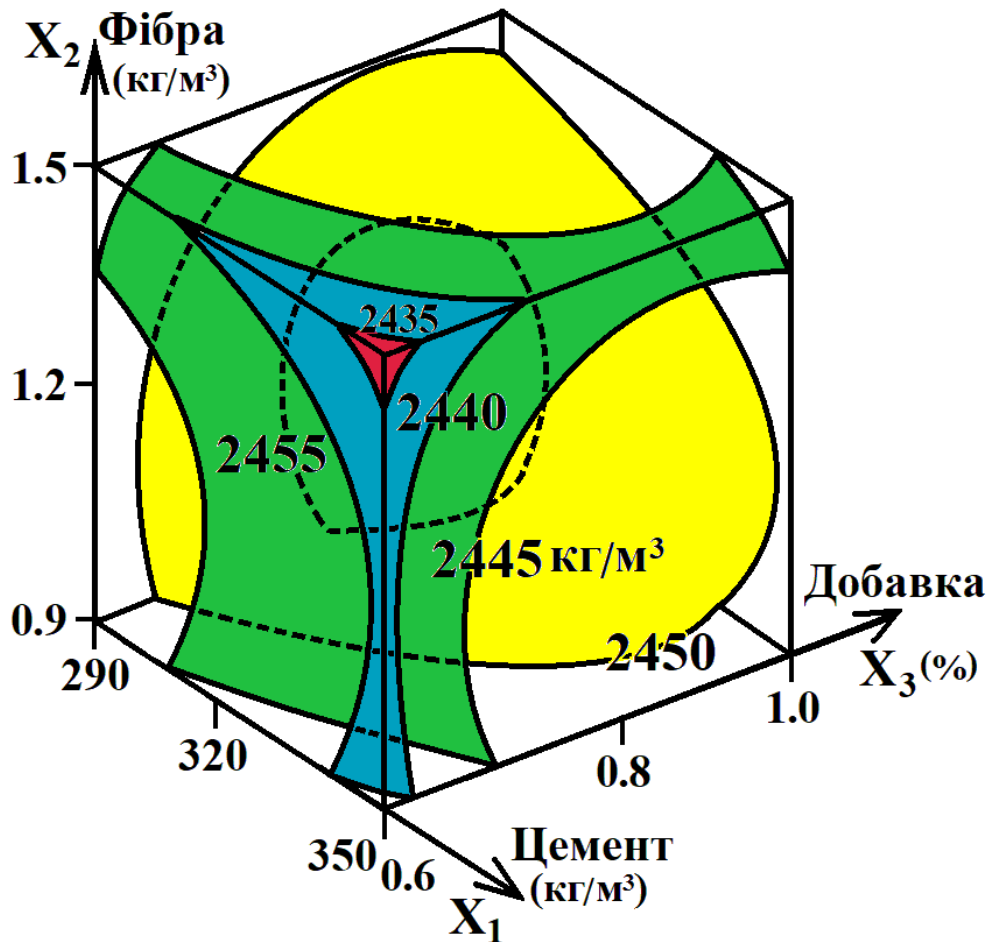


Рис.4.3 Вплив варійованих факторів складу на середню густина фібробетонів

Аналіз наведеної на рисунку 4.3 діаграми показує, що при зростанні кількості портландцементу у складі фібробетонів з 290 до 350 кг/м<sup>3</sup> їх середня густина знижується на 7–8 кг/м<sup>3</sup>. Це пояснюється зростанням розсунення щебеню та відповідно деяким зменшенням вмісту цього найбільш щільного компоненту. При підвищенні кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,5 кг/м<sup>3</sup> середня густина фібробетонів знижується на 5–7 кг/м<sup>3</sup>, що обумовлено зміною В/Ц суміші. Також за рахунок зниження В/Ц при збільшенні кількості суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G до 0,9-1% від маси цементу середня густина фібробетонів зростає на 8–10 кг/м<sup>3</sup>.

В цілому діапазон зміни середньої густини досліджених фібробетонів вказує, що даний структурний показник в межах факторного простору експерименту не буде мати суттєвого впливу на властивості композитів.

### 4.3 Міцність на стиск досліджених фібробетонів у різному віці

Як зазначалося вище, міцність на стиск, а точніше мінімальний клас за міцністю бетонів на стиск дорожніх покриттів регламентується вимогами ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» [169] та ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування» [12] в залежності від категорії дороги.

Значення ранньої міцності бетонів дорожніх покриттів є важливим з точки зору зручності виконання послідовних технологічних процесів при будівництві та темпів можливого відкриття руху по збудованій ділянці автомобільної дороги.

Для всіх досліджених фібробетонів визначалася їх міцність на стиск у віці 3 і 28 діб (Таблиця 4.3).

За даними, наведеними у таблиці 4.2, була побудована ЕС-модель, яка відображає вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск фібробетонів у віці 3 діб:

$$\begin{aligned}
 f_{cm,3} \text{ (МПа)} = & 34,54 + 6,00x_1 - 1,14x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,10x_1x_3 \\
 & + 0,35x_2 - 0,59x_2^2 - 0,20x_2x_3 \\
 & + 1,16x_3 - 1,04x_3^2
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

ЕС-модель, яка відображає вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск фібробетонів у проектному віці 28 діб має вигляд:

$$\begin{aligned}
 f_{cm} \text{ (МПа)} = & 51,58 + 9,33x_1 - 1,43x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,31x_1x_3 \\
 & + 0,94x_2 - 0,78x_2^2 - 0,26x_2x_3 \\
 & + 1,63x_3 - 1,43x_3^2
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Міцність досліджених фібробетонів на стиск у віці 3 і 28 діб

№ точки	Міцність на стиск (МПа)	
	у віці 3 діб	у віці 28 діб
1	24,0	36,1
2	26,6	39,3
3	27,4	40,4
4	25,5	38,8
5	26,9	40,7
6	33,6	49,7
7	32,0	48,2
8	34,9	52,2
9	34,8	51,8
10	34,1	51,5
11	36,2	54,3
12	38,8	58,5
13	39,2	59,6
14	37,0	56,4
15	39,2	59,8

Поля властивостей ЕС-моделей (4.3) і (4.4) мають мінімальні значення  $f_{cm,3,min} = 24,14$  МПа і  $f_{cm,min} = 36,20$  МПа у точках з однаковими координатами  $x_1 = x_2 = x_3 = -1$ , тобто при мінімальній кількості цементу, суперпластифікатору та фібри. Максимальні значення міцності на стиск у віці 3х діб  $f_{cm,3,max} = 39,79$  МПа спостерігається у точці з координатами  $x_1 = 1$ ,  $x_2 = 0,29$ ,  $x_3 = 0,58$ , у віці 28ми діб – у точці з близькими координатами  $x_1 = 1$ ,  $x_2 = 0,50$ ,  $x_3 = 0,63$ . Тобто найбільшу міцність на стиск мають фібробетони при максимальній кількості цементу, кількості базальтової фібри близько  $1,3$  кг/м<sup>3</sup> і кількості суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G близько 0,9%.



За ЕС-моделями (4.3) і (4.4) були побудовані однофакторні діаграми, які відображають вплив варійованих факторів на міцність на стиск досліджених фібробетонів у зонах екстремумів відповідно у віці 3х діб (рис.4.4.а) і 28ми діб (рис.4.4.б). Побудова проходила за методикою, аналогічною побудові діаграм на рисунку 4.1.

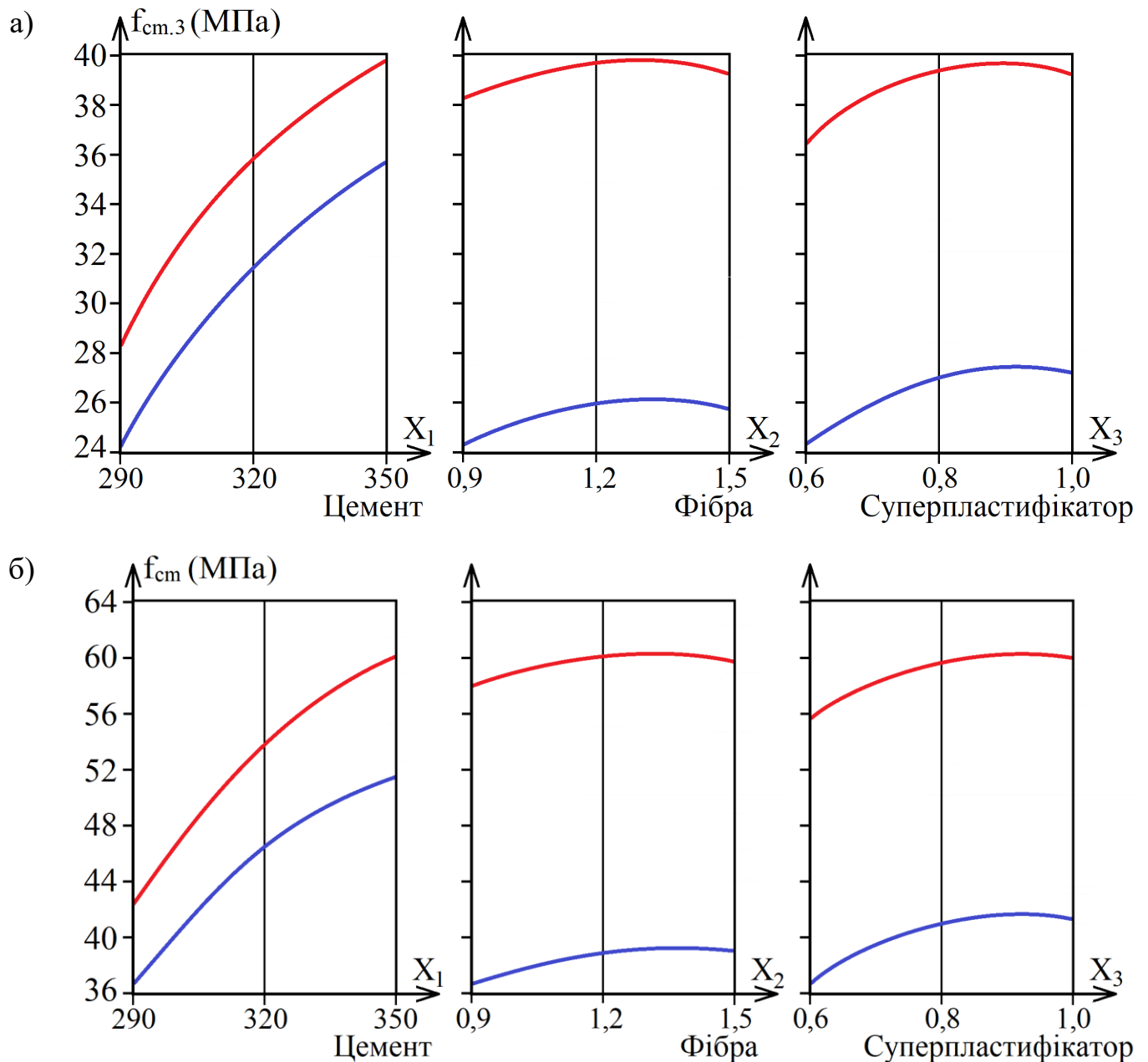


Рис.4.4 Вплив варійованих факторів складу на міцність фібробетонів на стиск у зонах екстремумів:

а) у віці 3 діб, б) у віці 28 діб

Як видно з діаграм на рисунку 4.4, загальний вплив варійованих факторів на міцність на стиск у ранньому 3х денному і проектному віці є аналогічним. При цьому дія всіх варійованих факторів має нелінійний характер.

У віці 3 діб міцність на стиск досліджених фібробетонів становить 65-68% від їх міцності у 28 денному віці.

Для детальнішого аналізу впливу варійованих факторів на міцність на стиск досліджених фібробетонів за ЕС-моделями (4.3) і (4.4) були побудовані діаграми у вигляді кубів, показані відповідно на рисунку 4.5.а і рисунку 4.5.б.

Аналіз даних діаграм дозволяє зробити висновок, що за рахунок підвищення кількості портландцементу у складі, міцність фібробетонів очікувано зростає. При цьому це зростання є більш відчутним у проектному віці (до 47%).

При підвищенні кількості базальтової фібри BAUCON®-bazalt з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м<sup>3</sup> міцність на стиск досліджених фібробетонів несуттєво зростає – на 0,7-1,0 МПа у віці 3х діб та на 1,5-2,1 МПа у віці 28 діб. Тобто на 3-3,5% у віці 3х діб і на 4,5% у віці 28ми діб.

Підвищення дозування суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9-1% від маси цементу викликає зниження В/Ц, за рахунок чого зростає міцність бетонів на стиск. У віці 3 діб величина цього зростання становить 2,3-2,6 МПа (8-10%), у віці 28 діб – 3,2-3,8 МПа (7-9%).

Таке досить обмежене зростання міцності на стиск при збільшенні кількості базальтової фібри і суперпластифікатору обумовлено тим, що в межах факторного простору експерименту, який проводився на даному другому етапі досліджень, вже при мінімальних рівнях факторів  $x_2$  і  $x_3$  (0,9 кг/м<sup>3</sup> базальтової фібри і 0,6% добавки полікарбоксилатного типу) вони оказують досить відчутний позитивний вплив на міцність бетонів. Цей позитивний вплив було встановлено на першому етапі експериментальних досліджень, який описано у 3-му розділі дисертації.

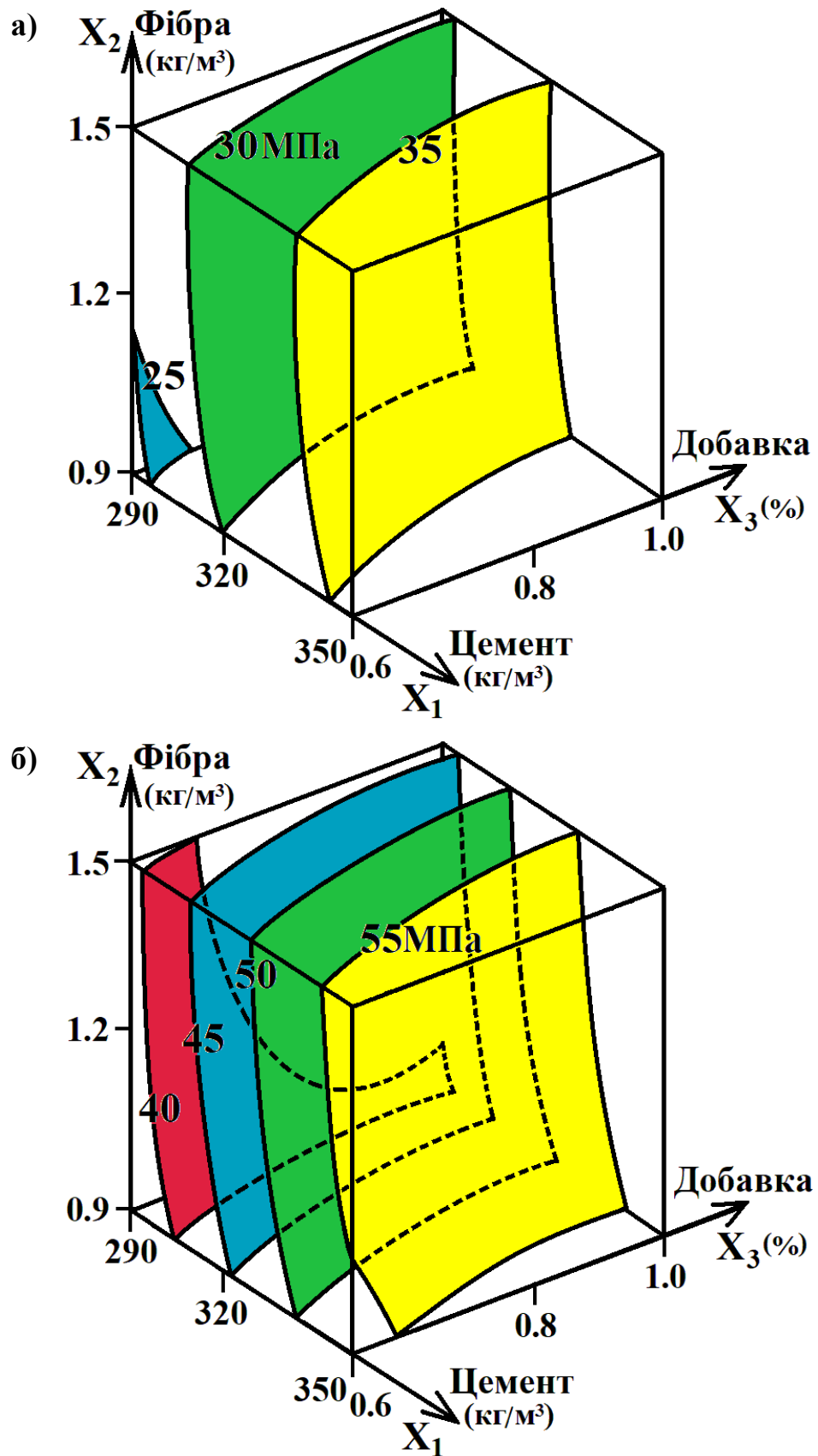


Рис.4.5 Вплив варійованих факторів складу на міцність фібробетонів на стиск:

а) у віці 3 діб, б) у віці 28 діб

В цілому досліджені на даному етапі роботи фібробетони забезпечують в залежності від складу вимоги ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» [169] щодо міцності (класу) бетону на стиск. Так для доріг II і III категорій клас бетону має бути не нижче В30, для доріг категорії Іб – В35, і для доріг категорії Іа – В40.

#### 4.4 Міцність фібробетонів на розтяг при згині у різному віці

Як відмічалось вище, для бетонів жорстких дорожніх покриттів міцність на розтяг при згині є більш важливим показником якості, ніж міцність на стиск, що обумовлено особливостями роботи покриттів при експлуатації.

Саме міцність на розтяг при згині та модуль пружності бетону є базовими показниками при розрахунку конструкції доріг з жорстким покриттям згідно ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування» [12]. Це пов'язано з дією різноспрямованих навантажень на дорожній одяг [186,53]. Значення міцності на розтяг при згині обумовлює стійкість бетону до дії розтягуючих напружень, які виникають від дії коліс транспортних засобів, через що у покриттях з часом можуть з'являтися втомні тріщини та інші пошкодження.

У таблиці 4.4 наведені експериментально визначені значення міцності досліджених фібробетонів на розтяг при згині у віці 3х і 28ми діб у всіх контрольних точках.

За наведеними у таблиці даними були побудовані ЕС-моделі, які відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених фібробетонів відповідно у віці 3 діб (4.5) і 28 діб (4.6):

$$\begin{aligned}
 f_{c,tf,3} \text{ (МПа)} = & 4,260 + 0,604x_1 - 0,208x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & + 0,242x_2 - 0,208x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\
 & + 0,073x_3 - 0,153x_3^2
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Міцність досліджених фібробетонів на розтяг при згині у віці 3 і 28 діб

№ точки	Міцність на розтяг при згині (МПа)	
	у віці 3 діб	у віці 28 діб
1	2,76	3,68
2	2,94	3,97
3	3,41	4,58
4	3,28	4,46
5	3,41	4,60
6	3,89	5,23
7	4,09	5,50
8	4,23	5,68
9	4,14	5,62
10	4,23	5,67
11	3,89	5,29
12	4,13	5,56
13	4,71	6,35
14	4,49	6,11
15	4,62	6,30

$$\begin{aligned}
 f_{c,tf} \text{ (МПа)} = & 5,722 + 0,832x_1 - 0,268x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & + 0,341x_2 - 0,283x_2^2 - 0,029x_2x_3 \\
 & + 0,101x_3 - 0,173x_3^2
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

У ЕС-моделей (4.5) і (4.6) поля їх властивостей мають мінімальні значення  $f_{c,tf,3,min} = 2,773$  МПа і  $f_{c,tf,min} = 3,696$  МПа у точках з однаковими координатами  $x_1 = x_2 = x_3 = -1$ . Тобто найменшу міцність на розтяг при згині мають фібробетони з мінімальною кількістю цементу, суперпластифікатору і базальтової фібри. Максимальні значення полів властивостей  $f_{c,tf,3,max} = 4,736$  МПа і  $f_{c,tf,max} =$

3,399 МПа спостерігається у точках з близькими між собою координатами  $x_1=1$ ,  $x_2 \approx 0,59$ ,  $x_3 \approx 0,24$ . Тобто найбільшу міцність на розтяг при згині мають фібробетони при максимальній кількості цементу, кількості базальтової фібри близько  $1,35 \text{ кг/м}^3$  і кількості суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G близько 0,85%.

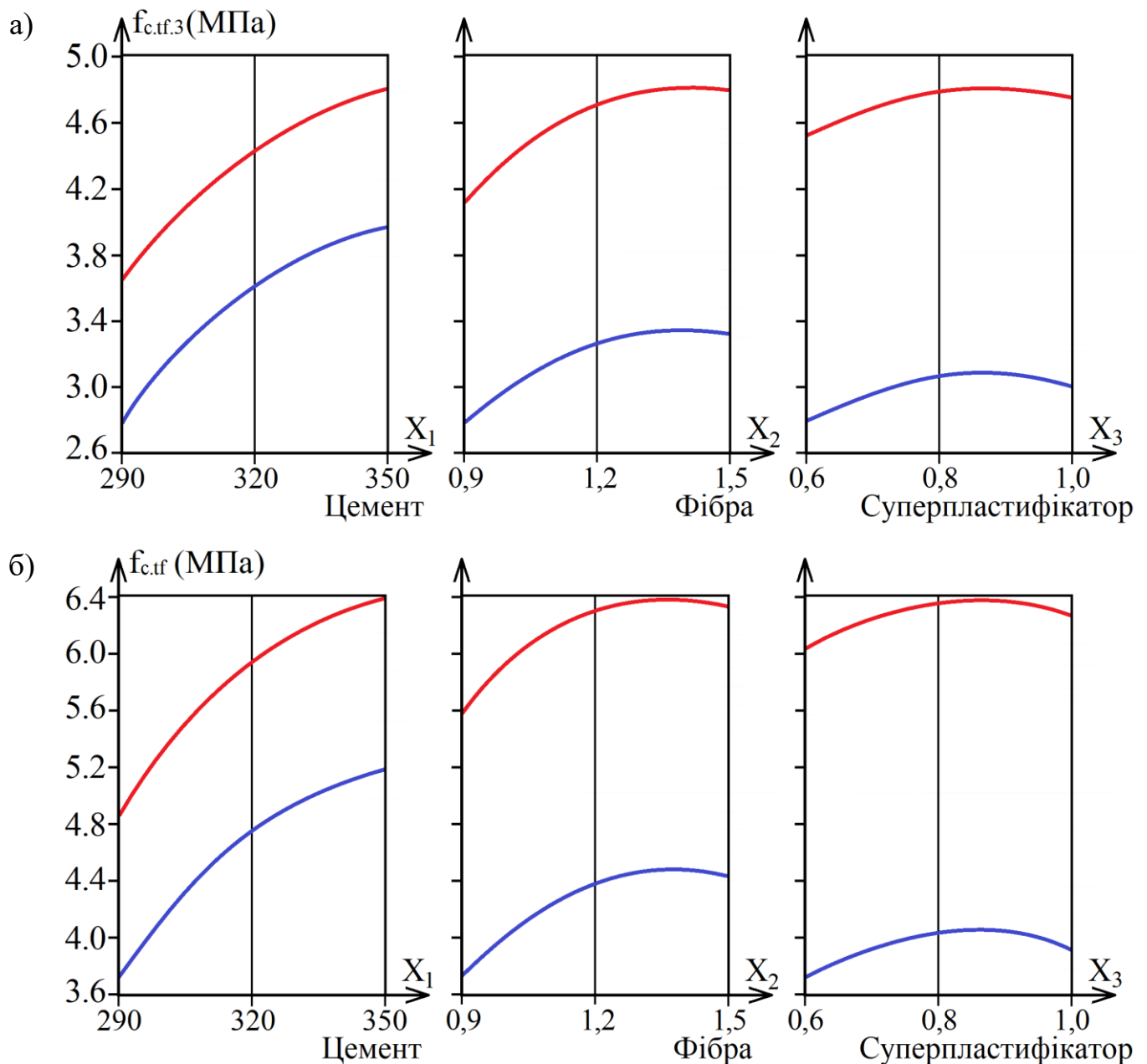


Рис.4.6 Вплив варійованих факторів складу на міцність фібробетонів

на розтяг при згині в зонах екстремумів:

а) у віці 3 діб, б) у віці 28 діб

За ЕС-моделями (4.4) і (4.5) були побудовані однофакторні діаграми, які відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених фібробетонів в зонах екстремумів у віці 3х діб (рис.4.6.а) і у віці 28ми діб (рис.4.6.б).

Аналіз діаграм на рисунку 4.6 та даних таблиці 4.4 показує, що досліджені на даному етапі роботи фібробетони характеризуються достатньо високою ранньою міцністю. Вже у віці 3 діб міцність досліджених фібробетонів на розтяг при згині становить 73-75% від рівня їх проектної міцності у віці 28 діб. Це важливо для матеріалів дорожніх покриттів з точки зору можливості проведення необхідних подальших технологічних операцій при будівництві, зокрема нарізання швів.

Також як видно з діаграм, вплив всіх факторів на величину міцності на розтяг при згині як у віці 3х діб, так і у проектному 28ми денному віці має нелінійний характер.

Для більш детального аналізу впливу варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених фібробетонів за ЕС-моделями (4.5) і (4.6) були побудовані діаграми у вигляді кубів, які наведені відповідно на рисунку 4.7.а і рисунку 4.7.б.

Аналіз наведених діаграм показує, що найбільш суттєво на рівень міцності на розтяг при згині досліджених фібробетонів у ранньому і проектному віці впливає кількість цементу у їх складі. За рахунок підвищення дозування в'язучого з 290 до 350 кг/м<sup>3</sup> міцність фібробетонів підвищується приблизно на 1,2 МПа у віці 3 діб та на 1,6-1,8 МПа у віці 28 діб (на 30-42%).

Зміна кількості суперпластифікатору в межах факторного простору експерименту, що проводився на даному етапі, несуттєво впливає на міцність фібробетонів на розтяг – при збільшенні кількості добавки STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9% від маси цементу міцність зростає лише на 0,25-0,35 МПа.

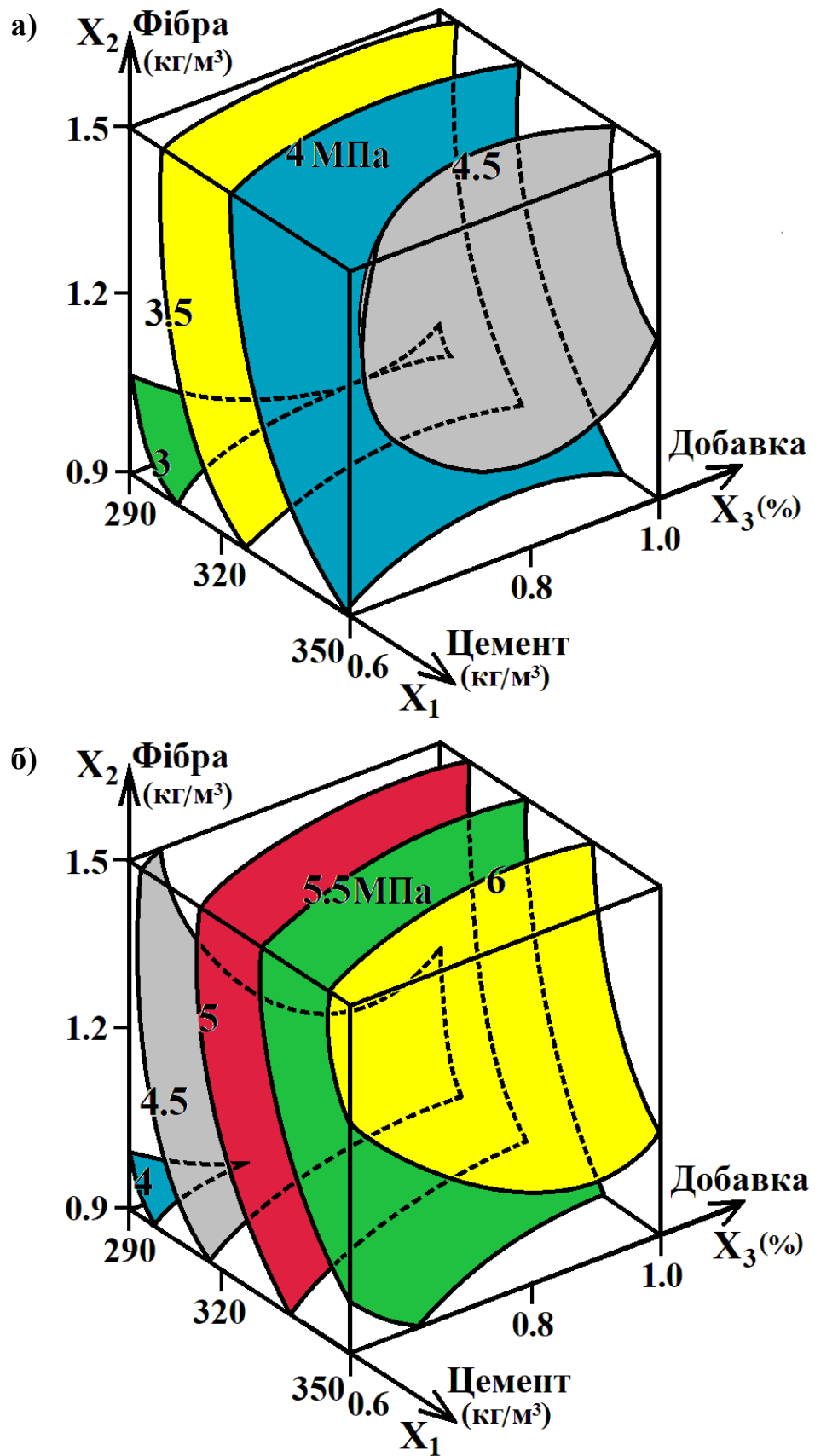


Рис.4.7 Вплив варійованих факторів складу на міцність фібробетонів на розтяг при згині: а) у віці 3 діб, б) у віці 28 діб



За рахунок збільшення кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м<sup>3</sup> міцність на розтяг при згині фібробетону у віці 3 діб зростає на 0,5-0,6 МПа, у віці 28 діб – на 0,7-0,8 МПа. Тобто дисперсна арматура достатньо ефективно підвищує міцність бетонів дорожніх покриттів на розтяг при згині

Таким чином в досліджених фібробетонах кількість базальтової фібри BAUCON®-bazalt 1,3 кг/м<sup>3</sup> можна визнати раціональною з позиції досягнення найбільш високої міцності на розтяг при згині, а також на стиск. Аналогічним чином раціональною кількістю суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G можна визнати 0,9% від маси цементу.

Проте оптимальна кількість фібри і добавки в бетоні має визначатися з врахуванням вимог до матеріалу конкретного покриття щодо міцності, морозостійкості тощо, а також економічного чиннику, тобто собівартості бетону.

#### **4.5 Морозостійкість і зносостійкість досліджених фібробетонів**

Як зазначалося вище, в процесі експлуатації бетони дорожніх покриттів піддаються постійному впливу стирання від коліс автотранспорту, а в зимовий період також багаторазовим впливам заморожування і відтаювання. Відповідно в типових для України та інших країн з помірним кліматом умовах, довговічність жорстких дорожніх покриттів визначається насамперед зносостійкістю (стираністю) і морозостійкістю бетону [187,188].

Вода при замерзанні займає більший об'єм. Тому раніше більшість дослідників вважала, що крига утворює місцеві напруження в порах бетону при кристалізації. Сьогодні відомо, що одною з основних причин морозного руйнування бетону як композиційного матеріалу з капілярно-пористою структурою є гідравлічний тиск, який виникає при замерзанні води у порах [189]. До інших причин руйнування бетону при заморожуванні і відтаванні

відносять різні коефіцієнти температурного розширення складових, осмос і прояви капілярних ефектів.

У роботах В.М. Вирового показано, що під дією заморожування та відтавання руйнування бетону відбувається насамперед завдяки розвитку технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу [113,190]. Наявність таких структурних елементів обумовлена тим, що бетон є грубогетерогенним композиційним матеріалом. При замерзанні води в технологічних тріщинах і поверхнях розділу виникають напруження, які здатні викликати геометричні зміни форми даних структурних елементів. Ці зміни в свою чергу викликають поступове просування фронту тріщини в бетоні. Крім того за рахунок напружень можуть з'являтися нові експлуатаційні тріщини на границі розділу «вода – лід». У випадку виходу фронту тріщини на вже існуючу внутрішню поверхню розділу в композиційному матеріалі ця тріщина також перетворюється на внутрішню поверхню розділу. Сукупність цих процесів викликає поступову деструкцію бетону при заморожуванні та відтаванні.

У таблиці 4.5 наведені експериментально визначені значення марки фібробетонів за морозостійкістю у всіх контрольних точках.

Таблиця 4.5

## Морозостійкість досліджених фібробетонів

№ точки	Марка за морозостійкістю		№ точки	Марка за морозостійкістю		№ точки	Марка за морозостійкістю
1	F150		6	F200		11	F200
2	F150		7	F200		12	F300
3	F200		8	F300		13	F300
4	F150		9	F200		14	F300
5	F200		10	F200		15	F300

ЕС-модель, яка побудована за даними таблиці 4.4 та яка відображає вплив варійованих факторів складу на морозостійкість фібробетонів, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 F \text{ (цикли)} = & 240 + 55x_1 + 25x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & + 15x_2 - 25x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\
 & + 15x_3 - 25x_3^2
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

Слід зауважити, що точність даної ЕС-моделі обмежена суттєвою дискретністю визначення рівня морозостійкості бетонів за прискореною методикою згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 [155] при заморожуванні до  $-50^\circ\text{C}$  та відтаванні у солоній воді. Згідно даній методиці та відповідно до Таблиці 3 ДСТУ Б В.2.7-47-96 [51] для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів розрізняються лише марки F100, F150, F200, F300, F400 і так далі. Відповідно експериментально визначені значення марки за морозостійкістю досліджених фібробетонів були в межах значень, якими оперує прискорена методика. Проте це суттєво не вплинуло на виявлення загальних тенденції впливу варійованих факторів на рівень морозостійкості бетону завдяки апроксимації, яка відбувається при розрахунку ЕС-моделей [164,165].

Поле властивостей ЕС-моделі (4.7) показує мінімальне значення  $F_{\min} = 130$  циклів у точці з координатами  $x_1 = x_2 = x_3 = -1$ , тобто при мінімальній кількості цементу, суперпластифікатору і базальтової фібри. Максимальне значення  $F_{\max} = 324$  цикли спостерігається у точці з координатами  $x_1 = 1$ ,  $x_2 \approx x_3 \approx 0,3$ , тобто при максимальній кількості цементу, кількості фібри VAUCON®-bazalt близько  $1,3 \text{ кг/м}^3$  і кількості добавки STACHEMENT 2570/5/G близько 0,86% від маси цементу. Як зазначалося вище, методика визначення морозостійкості бетонів фактично не дозволяє отримувати значення марок, що відрізняються від визначених у ДСТУ Б В.2.7-47-96 [51]. Проте завдяки апроксимації ЕС-модель може оперувати такими значеннями.

За ЕС-моделью (4.7) були побудовані однофакторні діаграми, які показані на рисунку 4.8 і які відображають вплив варійованих факторів на

морозостійкість досліджених фібробетонів в зонах мінімальних і максимальних значень (екстремумів).

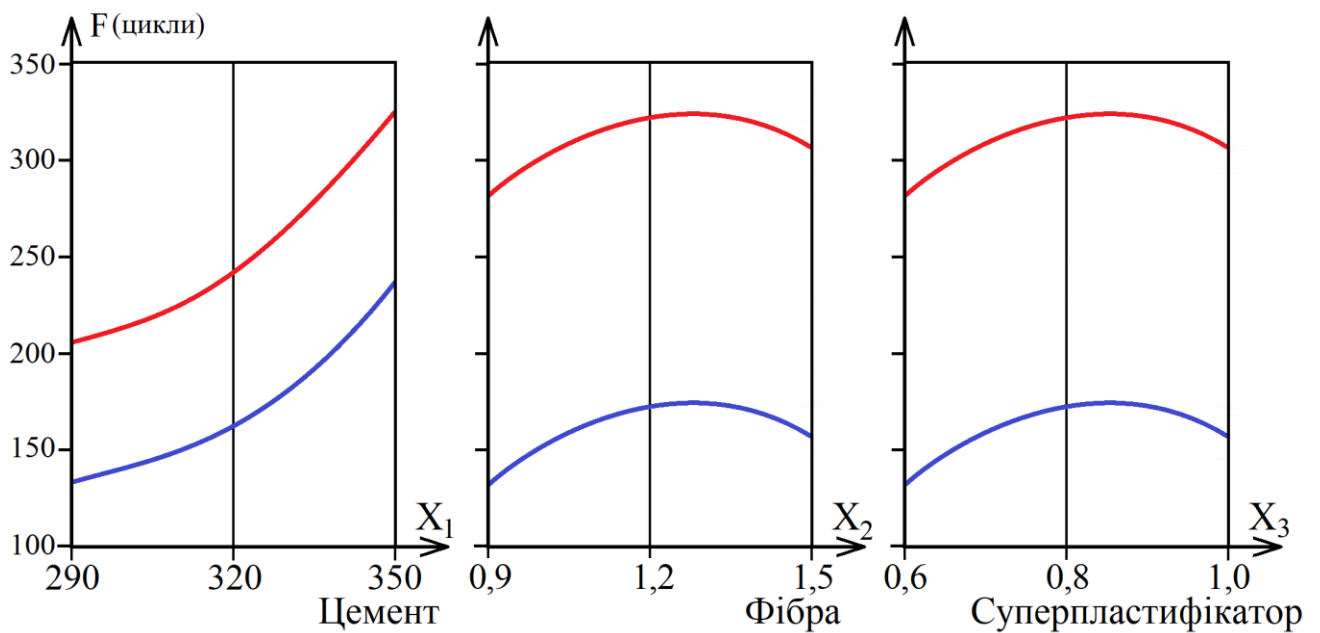


Рис.4.8 Вплив варійованих факторів складу на морозостійкість фібробетонів в зонах екстремумів

Аналіз наведених на рисунку 4.8 діаграм дозволяє зробити висновок, що вплив всіх 3х варійованих факторів складу на марку бетону за морозостійкістю має нелінійний характер. При цьому у міру збільшення кількості портландцементу вплив даного фактору на величину  $F$  дещо зростає. Для факторів  $X_2$  і  $X_3$  криві залежності  $F$  від рівня факторів мають близький характер з максимумом при раціональній з позиції досягнення більшої морозостійкості кількості дисперсної арматури і суперпластифікатору.

Для аналізу впливу варійованих факторів складу у їх взаємодії на морозостійкість досліджених на даному етапі роботи фібробетонів за ЕС-моделлю (4.7) була побудована діаграма у вигляді куба, наведена на рисунку 4.9.

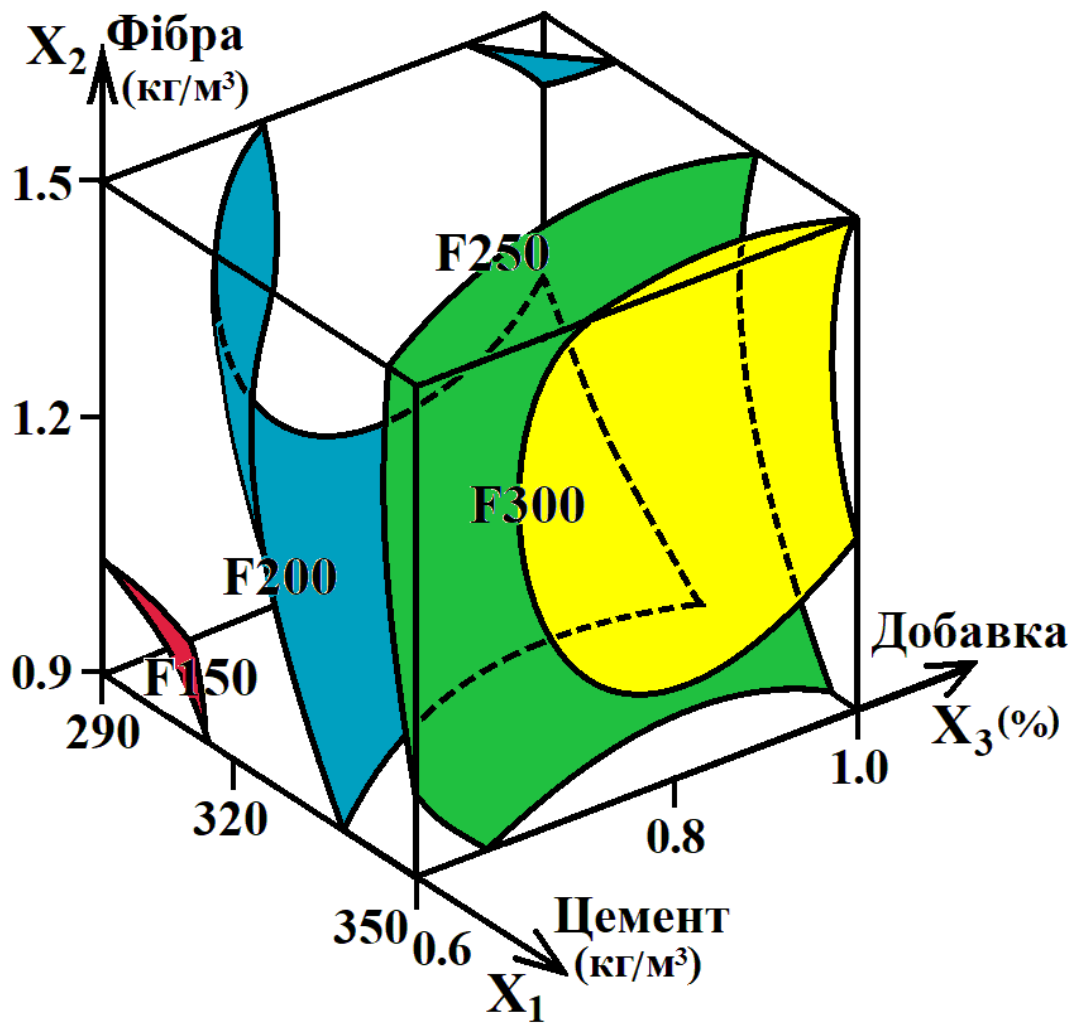


Рис.4.9 Вплив варійованих факторів складу на морозостійкість фібробетонів

Як показує аналіз діаграми на рисунку 4.9, завдяки збільшенню кількості портландцементу у складі з 290 до 350 кг/м<sup>3</sup> рівень морозостійкості фібробетонів підвищується приблизно на 100 циклів. Збільшення кількості базальтової фібри BAUCON®-bazalt з 0,9 до 1,3 кг/м<sup>3</sup> підвищує морозостійкість бетонів жорстких дорожніх покриттів приблизно на 50 циклів. Аналогічне підвищення морозостійкості відбувається при збільшенні кількості суперпластифікатору з 0,6 до 0,9% від маси цементу. При використанні раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G фібробетони вже при кількості портландцементу 300 кг/м<sup>3</sup> забезпечують морозостійкість F200, що відповідає вимогам до матеріалів дорожніх покриттів [169].

Як зазначалося вище, в процесі експлуатації бетони дорожніх покриттів піддаються постійному впливу стирання від коліс автотранспорту. Відповідно

зносостійкість є важливою характеристикою, яка в значній мірі обумовлює довговічність бетонів жорстких дорожніх покриттів. При цьому даний показник є важливим не лише з позицій експлуатації при впливах стирання, а при комплексних морозо-сольових впливах. У роботі С.Н. Толмачева [178] показано, що при збільшенні стираності бетону до  $0,75 \text{ г/см}^2$  він майже втрачає здатність протистояти морозо-сольовому впливу. Тому як відмічалось вище, автори [178] рекомендують обмежувати стираність  $G$  для дорожніх покриттів рівнем не вище  $0,50 \text{ г/см}^2$ .

Експериментально визначені значення стираності досліджених на даному етапі роботи фібробетонів у всіх контрольних точках наведені у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

## Стиранність досліджених фібробетонів

№ точки	Стиранність, $G \text{ (г/см}^2\text{)}$	№ точки	Стиранність, $G \text{ (г/см}^2\text{)}$	№ точки	Стиранність, $G \text{ (г/см}^2\text{)}$
1	0,41	6	0,38	11	0,37
2	0,40	7	0,36	12	0,36
3	0,38	8	0,34	13	0,32
4	0,39	9	0,34	14	0,32
5	0,38	10	0,32	15	0,32

На рисунку 4.10 наведено фото зразків фібробетону (склад №1) після проведення визначення їх стираності на колі стирання ЛКИ-3 відповідно до ДСТУ Б В.2.7-212:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стираності» [156].

За даними, наведеними у таблиці 4.6, була побудована ЕС-модель, яка відображає вплив варійованих факторів складу на стираність досліджених фібробетонів:



Рис.4.10 Фото зразків фібробетону (склад №1) після проведення визначення стираності на колі стирання ЛКИ-3

$$\begin{aligned}
 G \text{ (г/см}^2\text{)} = & 0,340 - 0,027x_1 + 0,009x_1^2 - 0,006x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & - 0,019x_2 + 0,009x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\
 & - 0,005x_3 + 0,009x_3^2
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Поле властивостей даної ЕС-моделі має мінімальне значення  $G_{\min} = 0,306 \text{ г/см}^2$  у точці з координатами  $x_1 = x_2 = 1$ ,  $x_3 = 0,27$ . Тобто найменшу стираність та відповідно кращу зносостійкість мають фібробетони з максимальною кількістю цементу і базальтової фібри BAUCON®-bazalt при кількості суперпластифікатору приблизно 0,86% від маси цементу. Максимальне значення поля властивостей  $G_{\max} = 0,414 \text{ г/см}^2$  спостерігається у точці з координатами  $x_1 = x_2 = x_3 = -1$ . Тобто найбільшу стираність і відповідно гіршу зносостійкість очікувано мають фібробетони з мінімальною кількістю цементу, базальтової фібри і суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G.

Побудовані за ЕС-моделлю (4.8) однофакторні діаграми, які відображають вплив варійованих факторів на стираність в зонах мінімальних і максимальних значень (екстремумів), показані на рисунку 4.11.

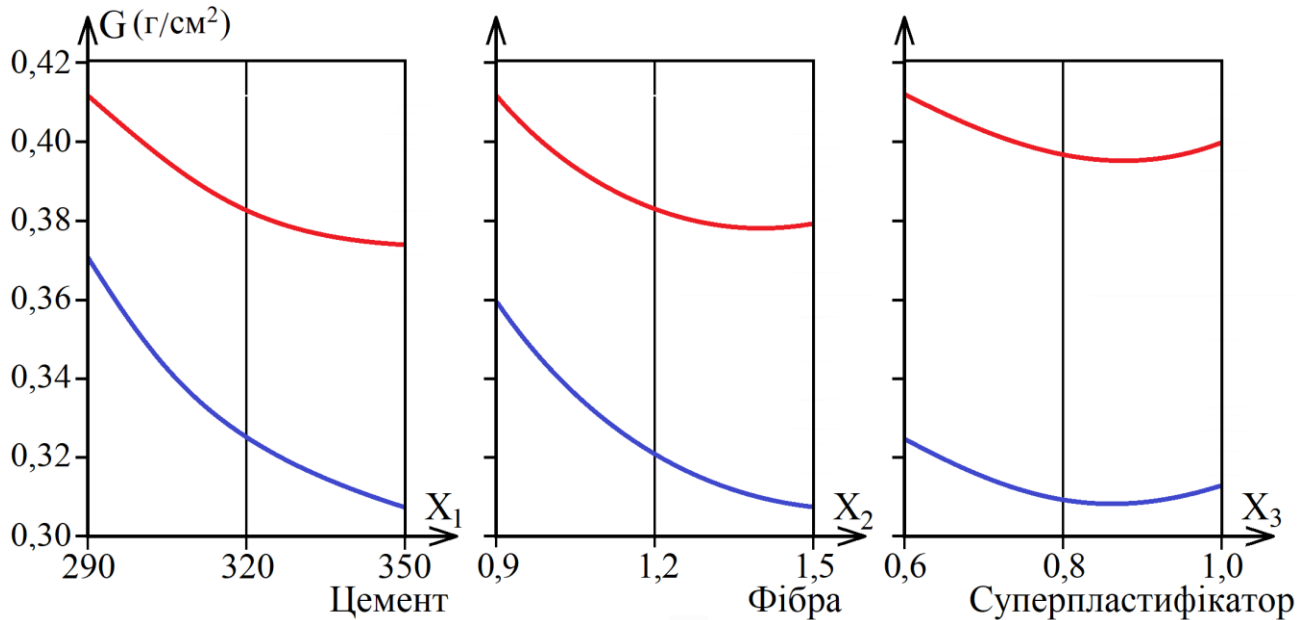


Рис.4.11 Вплив варійованих факторів складу на стиранність фібробетонів в зонах екстремумів

Аналіз даних діаграм показує, що аналогічно впливу на морозостійкість вплив всіх 3х варійованих факторів складу на стираність фібробетонів має нелінійний характер. Проте вплив кількості портландцементу на стираність бетонів має дещо інший характер, ніж на морозостійкість. При збільшенні дозування в'язучого з 320 до 350  $\text{кг/м}^3$  значення  $G$  змінюється менш відчутно, ніж при збільшенні кількості цементу від 290 до 320  $\text{кг/м}^3$ .

Для більш детального аналізу впливу варійованих факторів на стираність досліджених на даному етапі роботи фібробетонів, зокрема з врахуванням їх взаємодії, була побудована показана на рисунку 4.12 діаграма.



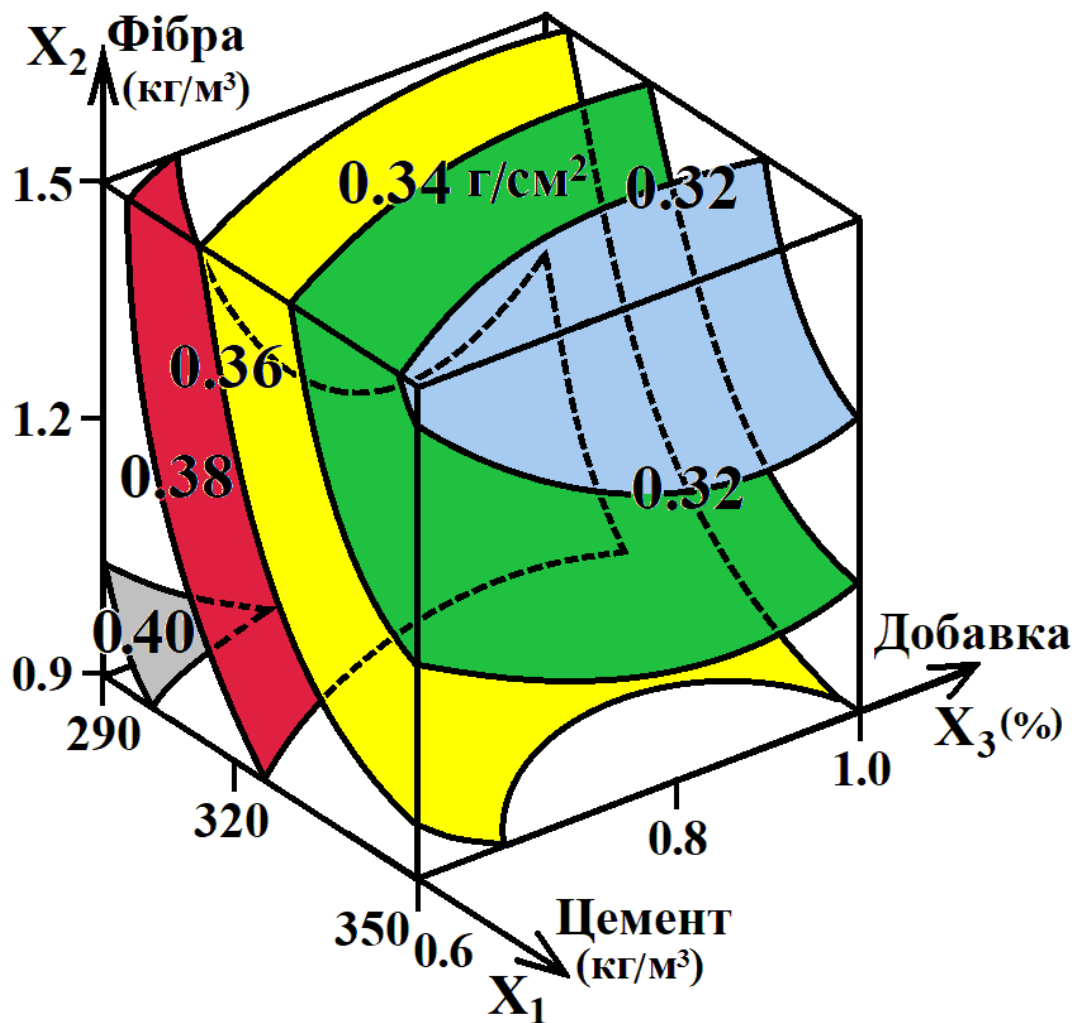


Рис.4.12 Вплив варійованих факторів складу на стиранисть фібробетонів

Аналіз наведеної на рисунку 4.12 діаграми та даних таблиці 4.6 показують, що при збільшенні кількості цементу в складі фібробетонів їх стиранисть знижується за рахунок підвищення міцності матеріалу (тобто зростає зносостійкість). При підвищенні кількості базальтової фібри BAUCON®-bazalt з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м<sup>3</sup> стиранисть бетонів знижується на 11-16%. Зміна кількості суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G в межах факторного простору експерименту несуттєво впливає на зносостійкість бетону. При використанні раціональної кількості дисперсної арматури і суперпластифікатору стиранисть фібробетонів знижується до 0,31 г/см<sup>2</sup> для бетонів з максимальною кількістю цементу та до 0,37 кг/см<sup>2</sup> для бетонів з мінімальною кількістю цементу (290 кг/м<sup>3</sup>). Тобто такі фібробетони характеризуються достатньо високою

зносостійкістю, що забезпечує їх довговічність в конструкціях дорожніх покриттів в умовах впливу від коліс автотранспорту.

В цілому найкращі показники морозостійкості за зносостійкості досліджених фібробетонів досягаються при використанні базальтової фібри BAUCON®-bazalt у кількості 1,3-1,4 кг/м<sup>3</sup> та суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G у кількості приблизно 0,86% від маси цементу. Бетони з такою кількістю дисперсної арматури і суперпластифікатору в залежності від кількості цементу мають стиранисть від 0,31 до 0,37 г/см<sup>2</sup> і морозостійкість від F200 до F300. Це забезпечує високу довговічність розроблених фібробетонів жорстких дорожніх покриттів в типових для України умовах експлуатації.

Проте як відмічалось вище, оптимальна кількість базальтової фібри і суперпластифікатору має визначатися з врахуванням вимог до матеріалу конкретного покриття та економічного чиннику.

#### **4.6 Рентгенофазовий аналіз цементуючої матриці та мікроскопічний аналіз мезоструктури бетонів**

В рамках даного другого етапу роботи був проведений рентгенофазовий аналіз цементуючої матриці бетону складу №15 (таблиця 2.5). Такий склад було обрано з врахуванням максимального вмісту в ньому цементу, базальтової фібри і суперпластифікатору.

Дифрактограма тонкої фракції цементуючої матриці бетону складу №15 наведена на рис.4.13. Основні фази та кількісний вміст за Рітвельдом основних кристалічних фаз цементуючої матриці даного бетону показано в таблицях 4.7 та 4.8.

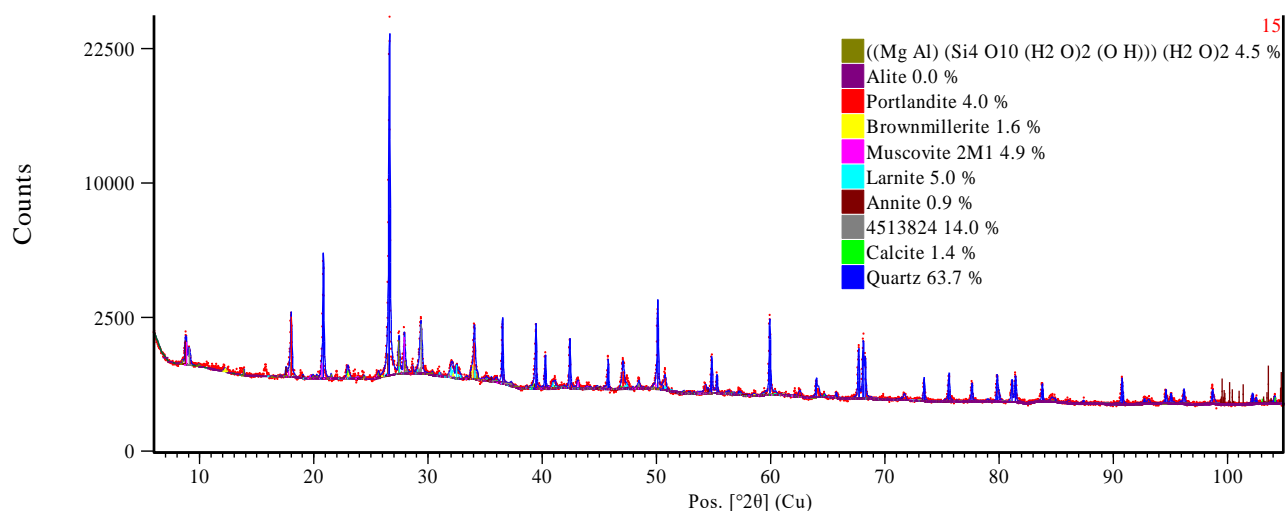


Рис.4.13 Дифрактограма та основні фази цементуючої матриці бетону

Таблиця 4.7

## Хімічні формули основних фаз цементуючої матриці бетону складу №15

Ref.Code	Score	Compound Name	Displ. [°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
96-900-9667	16	Quartz	-0.086	0.239	Si3,00 O6,00
96-901-5461	7	Calcite	-0.073	0.011	Ca6,00 C6,00 O18,00
96-451-3825	8	4513824	-0.129	0.028	C8,00 O32,00 H20,00 Na12,00
96-900-2316	12	Annite	-0.042	0.021	Si5,10 Al6,90 Fe6,00 K1,98 Na0,02 O24,00
96-901-2790	9	Larnite	-0.175	0.022	Ca8,00 Si4,00 O16,00
96-101-1050	7	Muscovite 2M1	-0.177	0.005	Si12,00 Al12,00 K4,00 O48,00 H0,00
96-901-4352	7	Brownmillerite	-0.152	0.008	Ca8,00 Fe5,80 Al2,20 O20,00
96-900-9099	14	Portlandite	-0.174	0.036	Ca1,00 O2,00
96-901-6126	8	Alite	0.022	0.037	Ca54,00 Si18,00 O90,00
96-153-3366	6	((Mg Al) (Si4 O10 (H2 O)2 (O H))) (H2 O)2	-0.254	0.013	Si16,00 O60,00 Mg4,00 Al4,00

Таблиця 4.8

## Кількісний вміст кристалічних фаз цементуючої матриці бетону складу №15

Sample ID	Rwp	((Mg Al) (Si4 O10 (H2 O)2 (O H))) (H2 O)2 [%]	Alite [%]	Portlandite [%]	Brownmillerite [%]	Muscovite 2M1 [%]	Larnite [%]	Annite [%]	4513824 [%]	Calcite [%]	Quartz [%]
15	6.5924	4.5	0.0	4.0	1.6	4.9	5.0	0.9	14.0	1.4	63.7

Таким чином, на дифрактограмі за методом Рітвельда слід виділити наведені нижче фази.

Кварцевий пісок  $\beta$ -SiO<sub>2</sub> в кількості 64 % як частина дрібного заповнювача. Решта припадає на цементний камінь, до складу якого входить Si16,00 O60,00 Mg4,00 Al4,00 = 4 (Mg Al Si<sub>4</sub> O<sub>15</sub>) алюмосилікат магнію – 4,5%. Серед продуктів гідратації у складі цементуючої матриці бетону слід виділити такі кристалічні фази як портландит Ca(OH)<sub>2</sub> (d/n=0,493; 0,263; 0,193 нм) в кількості 4,0% та кальцит CaCO<sub>3</sub> (d/n=0,303; 0,249 нм) – 1,4% (продукт карбонізації гідроксиду кальцію). Разом з тим, згідно стехіометрії продуктів гідратації портландцементу [191,192] основною гідратною фазою в цементному камені є тоберморитоподібні гідросилікати кальцію C-S-H. Проте такі фази є рентгеноаморфні і тому не фіксуються на дифракторах.

Результати дослідження елементного аналізу тонкої фракції наведені на рисунку 4.14. Кількісний вміст основних елементів тонкої фракції представлено в таблиці 4.9. Слід відзначити значний вміст кальцію (в перерахунку на CaO – 36,7%), який зосереджений як у складі кристалогідратів, так і в структурі гідросилікатів кальцію.

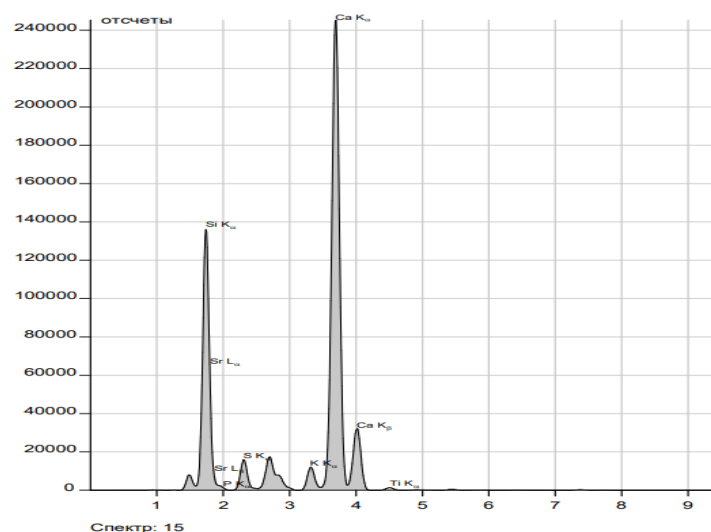


Рис. 4.14 Рентгеноспектральний аналіз тонкої фракції цементуючої матриці

## Елементний склад тонкої фракції цементуючої матриці складу №15

At. number	Element	Series	Intensity	Concentration
12	MgO	K	1901	0.5194 ± 0.0540%
13	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K	58415	6.0102 ± 0.0405%
14	SiO <sub>2</sub>	K	1021305	51.2717 ± 0.0487%
15	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	2333	0.0546 ± 0.0086%
16	SO <sub>3</sub>	K	126701	1.4783 ± 0.0047%
19	K <sub>2</sub> O	K	10727	1.1010 ± 0.0411%
20	CaO	K	424310	35.6878 ± 0.0573%
22	TiO <sub>2</sub>	K	5035	0.3290 ± 0.0112%
24	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K	477	0.0099 ± 0.0027%
25	MnO	K	7416	0.0851 ± 0.0024%
26	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K	379659	3.3163 ± 0.0089%
30	ZnO	K	14114	0.0287 ± 0.0005%
37	Rb <sub>2</sub> O	K	11743	0.0066 ± 0.0004%
38	SrO	K	128779	0.0698 ± 0.0005%
39	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K	3942	0.0023 ± 0.0004%
40	ZrO <sub>2</sub>	K	43631	0.0256 ± 0.0005%
82	PbO	L	2659	0.0037 ± 0.0004%

Для складу №15 з використанням цифрового мікроскопу типу Sigeta Forvard 10-500× також була досліджена макро- і мезоструктура (рис.4.15, 4.16, 4.17).

Аналіз макроструктури (рис.4.15) показав рівномірність розподілу волокон базальтової фібри в композиті та фактичну відсутність крупних пор в бетоні. Це свідчить про належну якість приготування і ущільнення суміші, що обумовлено використанням якісних заповнювачів та ефективного суперпластифікатору.

Аналіз контактної зони крупного заповнювача з цементно-піщаною матрицею в фібробетоні (рис.4.16) показав рівномірне розподілення матриці на поверхні щебеню без видимих внутрішніх тріщин та поверхонь розділу. Це забезпечує необхідну сумісну роботу компонентів композиційного матеріалу.



Рис.4.15 Макроструктура фібробетону складу №15

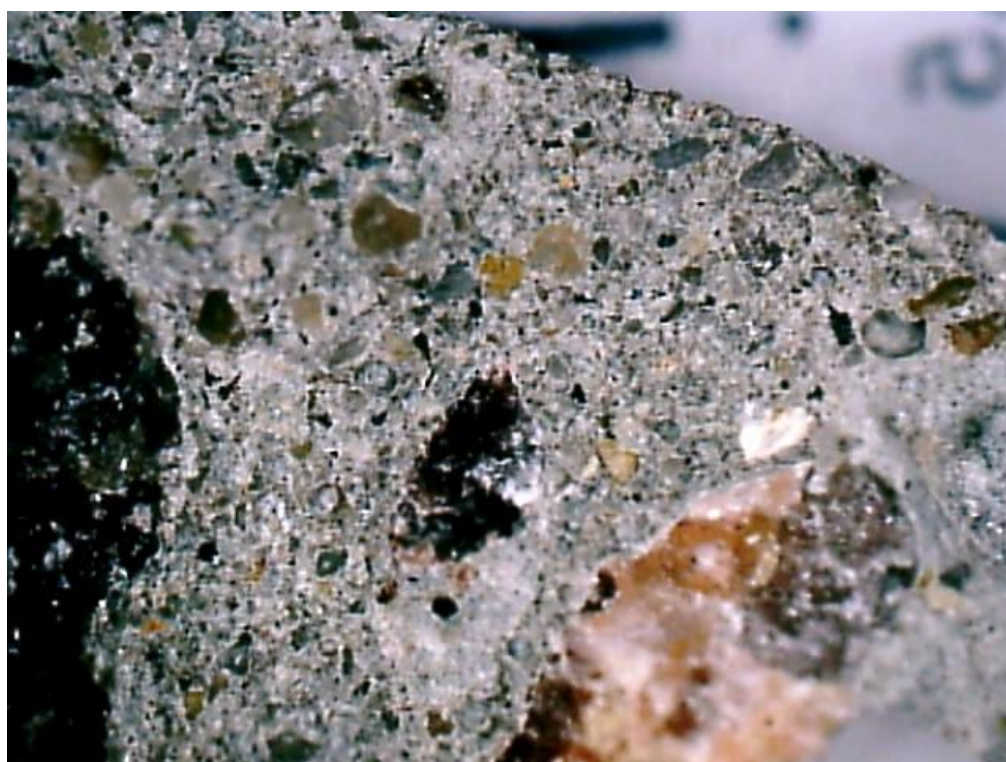


Рис. 4.16 Контактна зона в фібробетоні складу №15



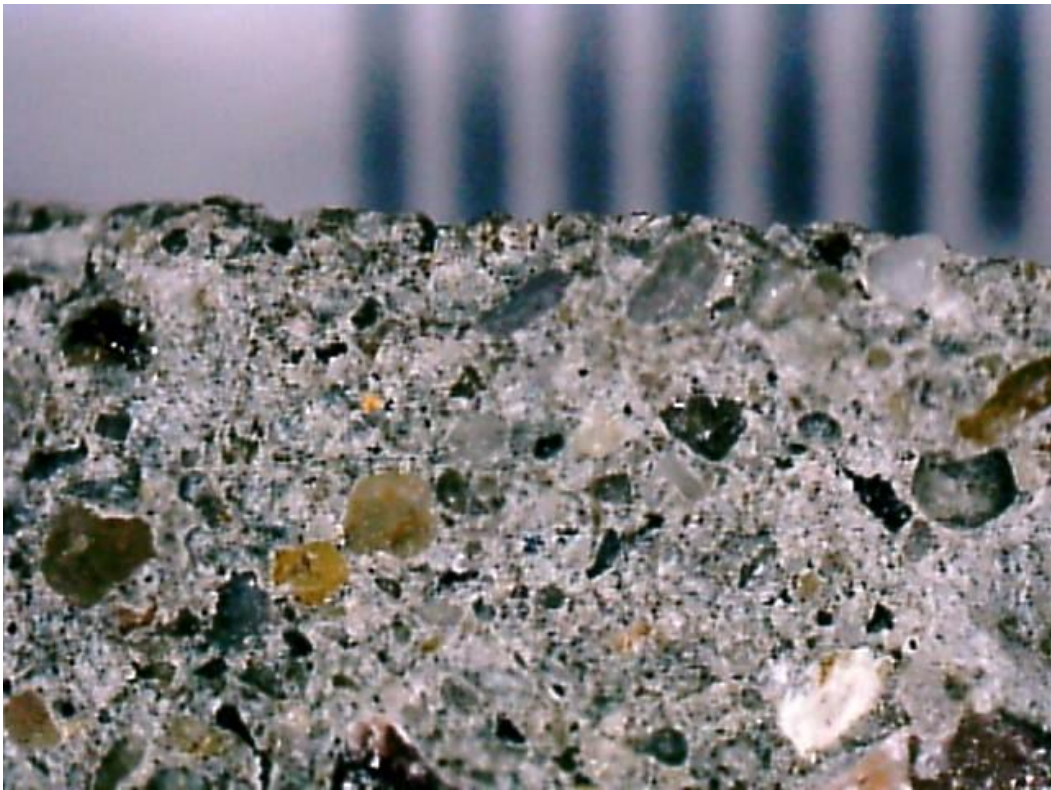


Рис. 4.17 Мезоструктура цементуючої матриці бетону  
(відстань між поділками 1 мм)

Мікроскопічний аналіз мезоструктури цементуючої матриці бетону (рис.4.17) виявив наявність рівномірно розподілених у об'ємі матриці пор невеликого діаметру, переважно до 0,5 мм. Це можна вважати одним з чинників, що забезпечував високу морозостійкість досліджених бетонів одночасно з іншими. Саме завдяки впливу на капілярно-порову структуру бетонів та дисперсному армуванню вирішувалося завдання підвищення довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів.

#### **4.7 Вибір оптимальних складів фібробетонів жорстких дорожніх покриттів**

На наступному кроці даного другого етапу роботи було здійснено вибір оптимальних з позиції міцності, довговічності та собівартості складів

фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для автомобільних доріг II-III, Iб і Ia категорій.

Міцність бетонів на стиск і на розтяг при згині, а також морозостійкість бетонів мають відповідати вимогам ДБН В.2.3-4:2015 [169] для відповідної категорії (Ia, Iб або II/III). До бетонів покриттів доріг II і III категорій висувуються однакові вимоги, до бетонів покриттів доріг Iб категорії – вищі, до бетонів покриттів доріг Ia категорії – ще вищі. При цьому собівартість обраних складів бетонів виходячи з економічної доцільності має бути близькою до мінімальної. Це важливо з врахуванням значного об'єму бетону, що використовується при влаштуванні жорстких дорожніх покриттів, зокрема при відновленні пошкодженої внаслідок бойових дій інфраструктури. Також при виборі оптимальних складів враховувалася зносостійкість (стираність) досліджених фібробетонів. Як показано вище, цей показник якості разом з морозостійкістю бетону є важливим з позиції забезпечення довговічності дорожнього покриття.

Собівартість фібробетонів у контрольних точках була розрахована в цінах грудня 2023 року, з врахуванням вартості приготування бетонних сумішей (таблиця 4.10).

Таблиця 4.10

## Собівартість досліджених фібробетонів в цінах грудня 2023 року

№ точки	Собівартість (грн./м <sup>3</sup> )		№ точки	Собівартість (грн./м <sup>3</sup> )		№ точки	Собівартість (грн./м <sup>3</sup> )
1	2898,90		6	3094,20		11	3180,30
2	2996,40		7	3097,50		12	3297,30
3	3005,00		8	3150,80		13	3297,20
4	3014,10		9	3203,70		14	3294,50
5	3010,10		10	3208,40		15	3410,50



За даними таблиці 4.10 була побудована наведена нижче ЕС-модель:

$$\begin{aligned} \text{Вар (грн./м}^3\text{)} = & 3151,12 + 155,53x_1 \pm 0x_1^2 + 12,31x_1x_2 + 17,440x_1x_3 \\ & + 47,05x_2 \pm 0x_2^2 - 12,81x_2x_3 \\ & + 43,27x_3 - 10,79x_3^2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Вибір оптимальних складів фібробетонів здійснювався графічним методом на діаграмах типу квадрат [168]. Тривимірна діаграма типу «куб», аналогічна рис.4.2, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9 і 4.12, охоплює весь факторний простір 3-х факторного експерименту, але при одночасному накладені на діаграмі такого типу значного числа ізоповрхонь декількох показників якості її читання стає складним. Це відбувається через необхідність аналізувати тривимірну діаграму за плоским зображенням.

Тому в даному кроці другого етапу роботи було застосовано прийом представлення факторного простору у вигляді 7 діаграм типу «квадрат» з осями  $X_2$  і  $X_3$ . Квадрати будувалися при фіксуванні рівня фактору  $x_1$  від  $-1$  до  $+1$  з кроком  $0,333$ , що відповідає кількості цементу у складі фібробетонів від  $290$  до  $350$  кг/м<sup>3</sup> з кроком  $10$  кг/м<sup>3</sup>. Така дискретизація дозволяє наочніше і точніше проводити пошук оптимальних рішень (рис.4.18, 4.19, 4.20).

Як відмічалось вище, проводився вибір оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для автомобільних доріг II і III категорій та окремо для доріг Ib категорії і Ia категорії. Відповідно керуючись вимогами ДБН В.2.3-4:2015 (додаток К) [169] до матеріалів покриттів доріг II і III категорій у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення фізико-механічних характеристик фібробетонів (рис.4.18):

- міцність на стиск  $f_{cm} \geq 40$  МПа (клас В30, С25/30), побудовані за ЕС-моделлю (4.4). Ізолінії на діаграмах зеленого кольору;
- міцність на розтяг при згині  $f_{c,tf} \geq 5$  МПа (клас В<sub>btb</sub>4,0), побудовані за ЕС-моделлю (4.6). Ізолінії на діаграмах червоного кольору;

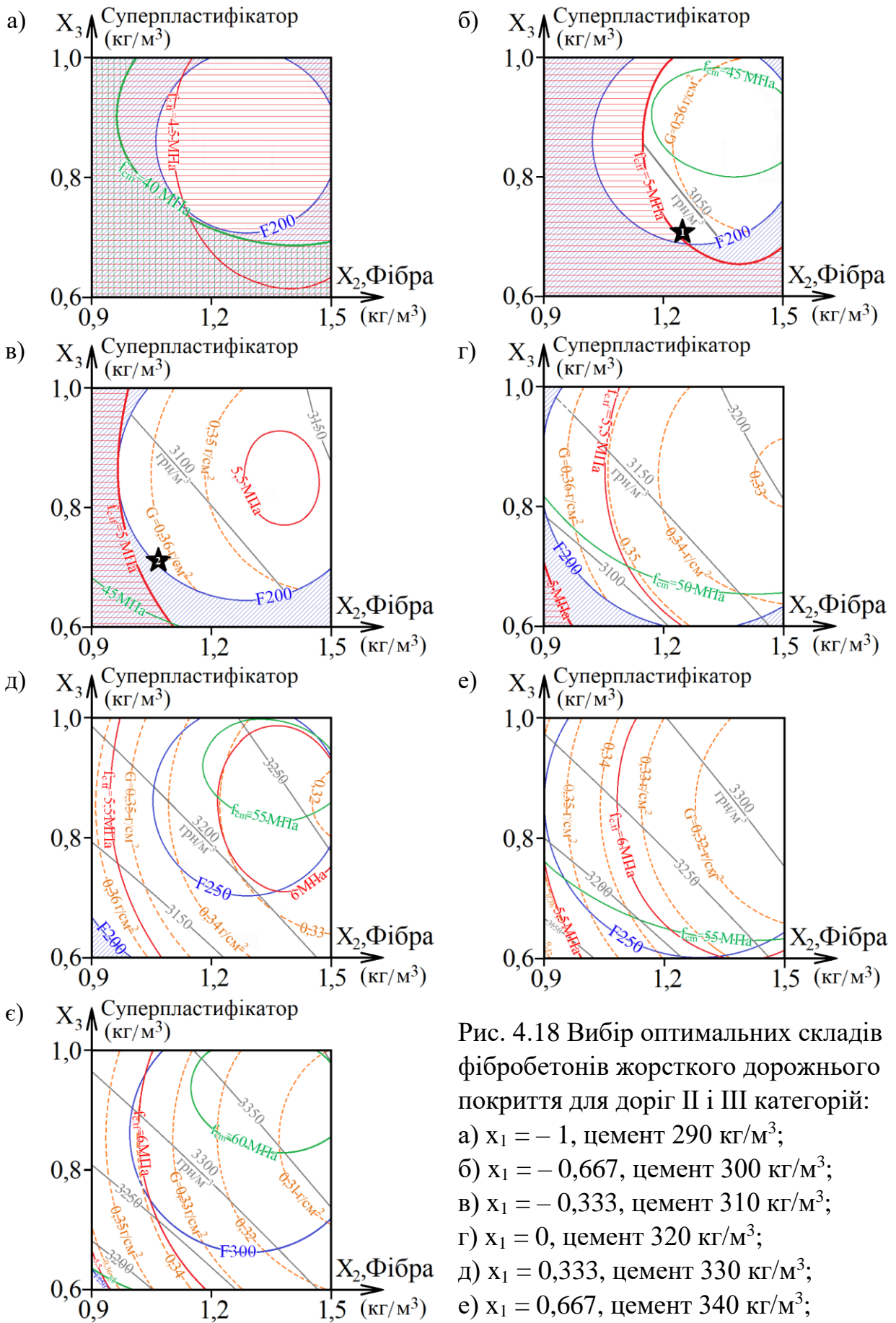


Рис. 4.18 Вибір оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг II і III категорій:

- а)  $x_1 = -1$ , цемент 290 кг/м<sup>3</sup>;
- б)  $x_1 = -0,667$ , цемент 300 кг/м<sup>3</sup>;
- в)  $x_1 = -0,333$ , цемент 310 кг/м<sup>3</sup>;
- г)  $x_1 = 0$ , цемент 320 кг/м<sup>3</sup>;
- д)  $x_1 = 0,333$ , цемент 330 кг/м<sup>3</sup>;
- е)  $x_1 = 0,667$ , цемент 340 кг/м<sup>3</sup>;
- е)  $x_1 = 1$ , цемент 350 кг/м<sup>3</sup>.

- морозостійкість  $\geq F200$ , побудовані за ЕС-моделлю (4.7). Ізолінії на діаграмах синього кольору.

У якості критерію оптимізації [164,168] при виборі рішень використовувався показник собівартості бетону. Ізолінії собівартості були побудовані за ЕС-моделлю (4.9) і показані на діаграмах сірим кольором. При виборі також контролювалася стираність фібробетону. Ізолінії стираності були побудовані за ЕС-моделлю (4.8) і показані на діаграмах штиховими лініями коричневого кольору.

Області діаграм, які не відповідали критеріям обмеження за міцністю і морозостійкістю, заштриховувалися відповідним кольором (зеленим та/або червоним та/або синім). У не заштрихованих зонах, тобто при виконанні вимог щодо всіх визначених критеріїв якості, було обрано два оптимальних склади фібробетонів для покриттів доріг II і III категорій. Перший склад при кількості цемент  $300 \text{ кг/м}^3$  (рис.4.18.б), другий склад при кількості цемент  $310 \text{ кг/м}^3$  (рис.4.18.в). Координати даних оптимальних складів помічено на діаграмах зірками з відповідними цифрами.

Обраний склад №1 для покриттів доріг II і III категорій має найменшу собівартість при забезпеченні необхідних рівнів всіх висунутих критеріїв –  $3040 \text{ грн./м}^3$ . Координати точки даного складу фібробетону в факторному просторі експерименту є наступними:  $x_1 = -0,667$ ,  $x_2 = 0,18$ ,  $x_3 = -0,45$ .

Склад №2 для покриттів доріг II і III категорій має собівартість  $3060 \text{ грн./м}^3$ , що лише на  $0,66\%$  вище собівартості складу №1. При цьому у порівнянні зі складом №1 фібробетон складу №2 характеризується дещо вищою міцністю на стиск. Координати точки даного складу є наступними:  $x_1 = -0,333$ ,  $x_2 = -0,4$ ,  $x_3 = -0,45$ .

Аналогічним чином, керуючись вимогами ДБН В.2.3-4:2015, при виборі оптимальних складів фібробетонів для покриттів доріг Ib категорії у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення фізико-механічних характеристик (рис.4.19):

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

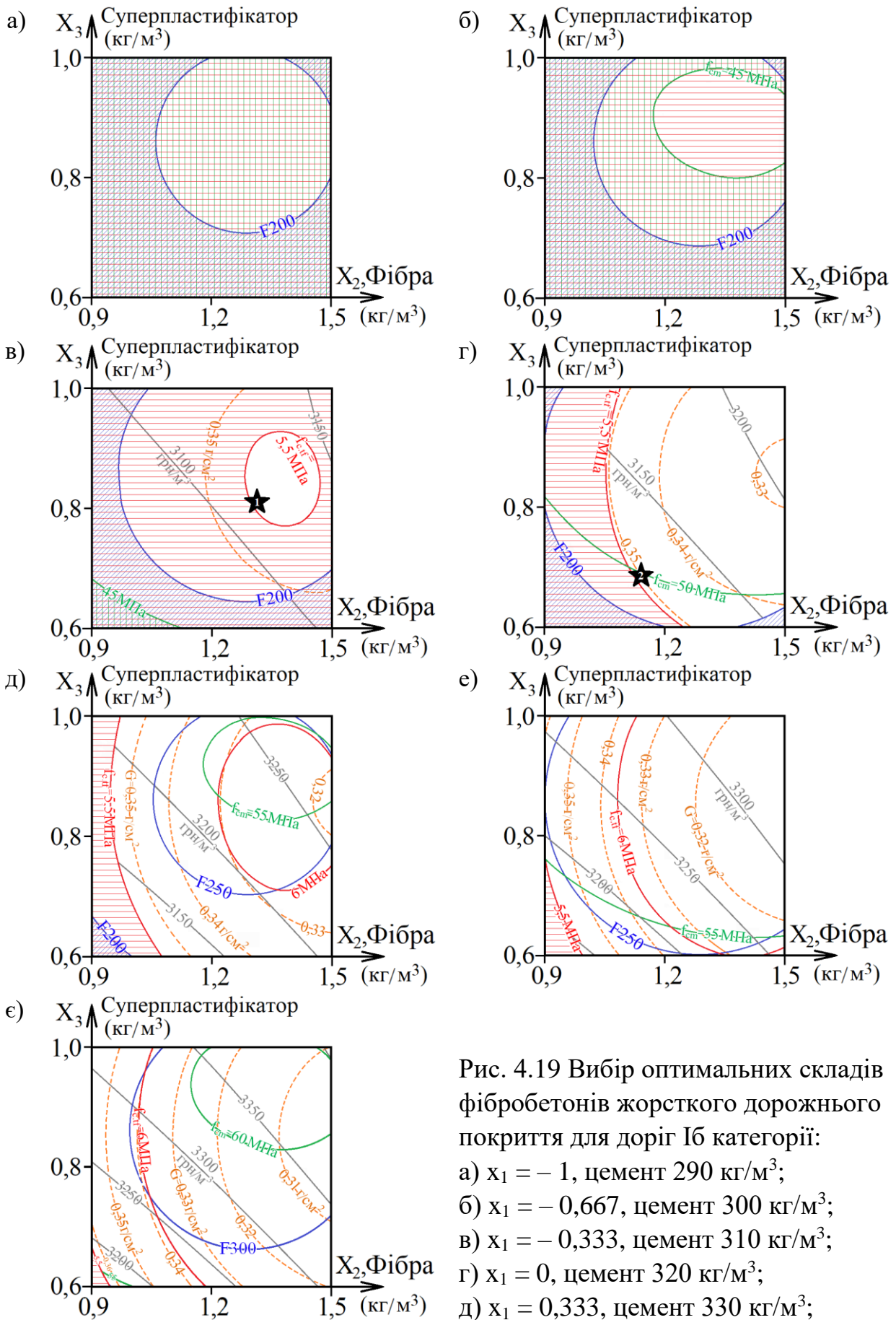


Рис. 4.19 Вибір оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг Іб категорії:  
 а)  $x_1 = -1$ , цемент 290 кг/м<sup>3</sup>;  
 б)  $x_1 = -0,667$ , цемент 300 кг/м<sup>3</sup>;  
 в)  $x_1 = -0,333$ , цемент 310 кг/м<sup>3</sup>;  
 г)  $x_1 = 0$ , цемент 320 кг/м<sup>3</sup>;  
 д)  $x_1 = 0,333$ , цемент 330 кг/м<sup>3</sup>;  
 е)  $x_1 = 0,667$ , цемент 340 кг/м<sup>3</sup>;  
 є)  $x_1 = 1$ , цемент 350 кг/м<sup>3</sup>.

- міцність на розтяг при згині  $f_{c.tf} \geq 5,5$  МПа (клас  $V_{btb}4,4$ );
- морозостійкість  $\geq F200$ .

Для покриттів доріг Іб категорії також було обрано два оптимальних склади фібробетонів, координати яких помічено на діаграмах зірками з відповідними цифрами. Перший склад при кількості цементу  $310 \text{ кг/м}^3$  (рис.4.19.в), другий склад при кількості цементу  $320 \text{ кг/м}^3$  (рис.4.19.г).

Склад №1 для покриттів доріг Іб категорії має собівартість  $3120 \text{ грн./м}^3$ . Координати точки даного складу фібробетону є наступними:  $x_1 = -0,333$ ,  $x_2 = 0,38$ ,  $x_3 = 0,1$ .

Склад №2 для покриттів доріг Іб категорії має майже аналогічну собівартість –  $3125 \text{ грн./м}^3$ , при цьому характеризується дещо вищою міцністю на стиск. Координати точки даного складу фібробетону:  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = -0,1$ ,  $x_3 = -0,55$ .

При виборі оптимальних складів фібробетонів для покриттів доріг Іа категорії також керуючись вимогами ДБН В.2.3-4:2015 у якості критеріїв обмеження використовувалися такі значення фізико-механічних характеристик (рис.4.20):

- міцність на стиск  $f_{cm} \geq 50$  МПа (клас В40, С32/40);
- міцність на розтяг при згині  $f_{c.tf} \geq 6,0$  МПа (клас  $V_{btb}4,8$ );
- морозостійкість  $\geq F200$ .

Аналогічно для покриттів доріг Іа категорії було обрано два оптимальних склади фібробетонів, координати яких помічено на діаграмах зірками. Перший склад при кількості цементу  $330 \text{ кг/м}^3$  (рис.4.20.д), другий склад при кількості цементу  $340 \text{ кг/м}^3$  (рис.4.20.е).

Склад №1 для покриттів доріг Іа категорії має собівартість  $3210 \text{ грн./м}^3$ . Координати точки даного складу фібробетону є наступними:  $x_1 = 0,333$ ,  $x_2 = 0,17$ ,  $x_3 = -0,05$ .

Склад №2 для покриттів доріг Іа категорії має близьку собівартість –  $3220 \text{ грн./м}^3$ , але характеризується дещо вищою міцністю на стиск. Координати точки даного складу фібробетону:  $x_1 = 0,667$ ,  $x_2 = 0$ ,  $x_3 = -0,65$ .

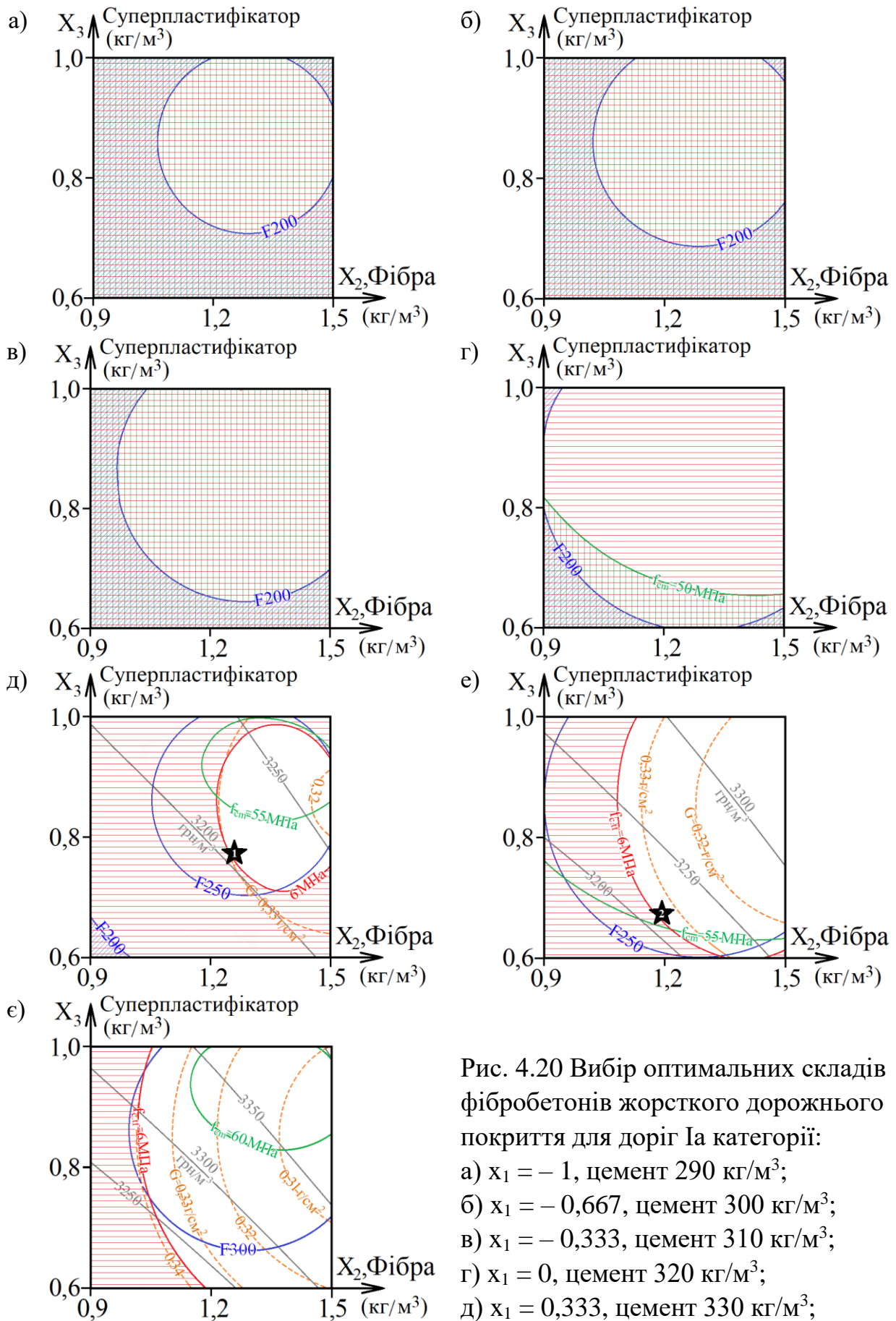


Рис. 4.20 Вибір оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг Іа категорії:  
 а)  $x_1 = -1$ , цемент 290 кг/м<sup>3</sup>;  
 б)  $x_1 = -0,667$ , цемент 300 кг/м<sup>3</sup>;  
 в)  $x_1 = -0,333$ , цемент 310 кг/м<sup>3</sup>;  
 г)  $x_1 = 0$ , цемент 320 кг/м<sup>3</sup>;  
 д)  $x_1 = 0,333$ , цемент 330 кг/м<sup>3</sup>;  
 е)  $x_1 = 0,667$ , цемент 340 кг/м<sup>3</sup>;  
 є)  $x_1 = 1$ , цемент 350 кг/м<sup>3</sup>.



Вміст компонентів суміші у обраних в результаті багатокритеріальної оптимізації складах (рецептури) і розрахункові механічні характеристики фібробетонів даних складів для покриттів доріг II і III категорій, Iб категорії та Ia категорії наведено у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11

Обрані оптимальні склади фібробетонів дорожніх покриттів  
та їх механічні характеристики

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

Продовження таблиці 4.11

№2 для покриттів доріг Іб категорії	Цемент – 320 кг/м <sup>3</sup> Щебінь – 1215 кг/м <sup>3</sup> Пісок – 803 кг/м <sup>3</sup> Фібра VAUCON®-bazalt – 1,17 кг/м <sup>3</sup> Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,22 кг/м <sup>3</sup> Вода – 134 л/м <sup>3</sup>	Міцність на стиск $f_{cm} = 50$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c,tf} = 5,5$ МПа Морозостійкість F200 Стиранність $G = 0,35$ г/см <sup>2</sup> Собівартість – 3125 кг/м <sup>3</sup>
№1 для покриттів доріг Іа категорії	Цемент – 330 кг/м <sup>3</sup> Щебінь – 1212 кг/м <sup>3</sup> Пісок – 793 кг/м <sup>3</sup> Фібра VAUCON®-bazalt – 1,25 кг/м <sup>3</sup> Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,61 кг/м <sup>3</sup> Вода – 136 л/м <sup>3</sup>	Міцність на стиск $f_{cm} = 54$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c,tf} = 6,0$ МПа Морозостійкість F250 Стиранність $G = 0,33$ г/см <sup>2</sup> Собівартість – 3210 кг/м <sup>3</sup>
№2 для покриттів доріг Іа категорії	Цемент – 340 кг/м <sup>3</sup> Щебінь – 1210 кг/м <sup>3</sup> Пісок – 784 кг/м <sup>3</sup> Фібра VAUCON®-bazalt – 1,2 кг/м <sup>3</sup> Добавка STACHEMENT 2570/5/G – 2,28 кг/м <sup>3</sup> Вода – 140 л/м <sup>3</sup>	Міцність на стиск $f_{cm} = 55$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{c,tf} = 6,0$ МПа Морозостійкість F250 Стиранність $G = 0,327$ г/см <sup>2</sup> Собівартість – 3220 кг/м <sup>3</sup>

Таким чином, з використанням отриманого в ході досліджень комплексу 3-х факторних ЕС-моделей проведена багатокритеріальна оптимізація та обрані оптимальні склади фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг Іа, Іб і II/III категорій. Тобто фактично для всіх категорій доріг, на яких використовуються жорсткі дорожні покриття.



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

Слід відміти, що при виробництві бетонів за обраними раціональними складами у реальних виробничих умовах необхідно проводити корегування їх складу відповідно до наявних сировинних матеріалів, зокрема при зміні крупності піску та активності цементу.

#### **4.8 Впровадження результатів досліджень**

Як зазначалося вище, фінальний третій етап дисертаційних досліджень було присвячено впровадженню результатів досліджень у виробництво та у навчальний процес.

Результати проведених досліджень були використані Дочірнім підприємством «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»». Рекомендовані склади фібробетонів з базальтовою фіброю використовувалися при влаштуванні жорсткого дорожнього покриття в процесі капітального ремонту автомобільної дороги загального користування державного значення Р-04 Київ – Фастів – Біла Церква – Звенигородка, км 212+220 – км 223+070, Звенигородського району Черкаської області.

Довідка про впровадження результатів досліджень у діяльності ДП «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»» наведена у Додатку Б.

Результати також були впроваджені в навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури та використовуються у методичних матеріалах освітніх компонентів «Наукові основи довговічності в будівництві та експлуатації автомобільних доріг та аеродромів» і «Ресурсозбереження та новітні технології у будівництві автомобільних доріг та

аеродромів» при підготовці магістрів спеціальність 192 - Будівництво та цивільна інженерія за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми». Також результати досліджень були використані при підготовці дипломних робіт магістрів спеціальності 192 - Будівництво та цивільна інженерія, які проходили підготовку за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми».

Довідка про впровадження результатів дисертаційних досліджень в навчальний процес в Одеській державній академії будівництва та архітектури наведена у Додатку Б.

### **Висновки за 4-м розділом**

1. Із застосуванням методів планування експерименту і експериментально-статистичного моделювання досліджені фізико-механічні властивості модифікованих фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю. Встановлено, що найменше В/Ц сумішей рівної рухомості досягається при введенні суперпластифікатору полікарбоксилатного типу STACHEMENT 2570/5/G у кількості 0,8-0,9% від мас цементу. При зміні кількості базальтової фібри від 0,9 до 1,5 кг/м<sup>3</sup> В/Ц суміші рівної рухомості практично не змінюється.

2. За рахунок підвищення кількості портландцементу у складі міцність фібробетонів на стиск очікувано зростає, при цьому у проектному віці більш відчутно, ніж у віці 3 діб. При підвищенні кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,5 кг/м<sup>3</sup> міцність на стиск зростає несуттєво. Підвищення дозування суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9-1% викликає зниження В/Ц, за рахунок чого міцність на стиск фібробетонів зростає у віці 3 діб на 2,3-2,6 МПа, у віці 28 діб – на 3,2-3,8 МПа.

3. На рівень міцності на розтяг при згині фібробетонів найбільш суттєво впливає кількість цементу у їх складі. За рахунок збільшення кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м<sup>3</sup> міцність на розтяг при згині у віці 3 діб

зростає на 0,5-0,6 МПа, у віці 28 діб – на 0,7-0,8 МПа. Зміна кількості суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G в межах факторного простору експерименту несуттєво впливає на міцність фібробетонів на розтяг при згині. Завдяки застосуванню раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатору отримано фібробетони з міцністю на стиск від 40 до 55 МПа та з міцністю на розтяг при згині від 4,5 до 6 МПа в залежності від кількості цементу у складі.

4. При збільшенні кількості цементу у складі фібробетонів з 290 до 350 кг/м<sup>3</sup> їх морозостійкість зростає на рівень до 100 циклів. При цьому за рахунок підвищення міцності також знижується стираність бетону, тобто зростає його зносостійкість. При підвищенні кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м<sup>3</sup> стираність бетонів знижується на 11-16%, а морозостійкість зростає приблизно на 50 циклів. Зміна кількості суперпластифікатору несуттєво впливає на зносостійкість бетону. При цьому при підвищенні кількості добавки STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9% від маси цементу морозостійкість фібробетонів зростає на рівень до 50 циклів.

5. Проведено рентгенофазовий аналіз цементуючої матриці та мікроскопічний аналіз структури фібробетону. Виявлено наявність рівномірно розподілених у об'ємі цементно-піщаної матриці пор невеликого діаметру, переважно до 0,5 мм.

6. З використанням комплексу отриманих ЕС-моделей та методу багатокритеріальної оптимізації обрано оптимальні склади фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг Іа, Іб і ІІ/ІІІ категорій. Обрані склади фібробетонів мають найменшу собівартість при забезпеченій необхідній міцності для відповідної категорії дороги та підвищену довговічність.

7. Рекомендовані склади фібробетонів з базальтовою фіброю були використані дочірнім підприємством «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»» при влаштуванні жорсткого дорожнього покриття автомобільної дороги Р-04 Київ – Фастів – Біла Церква –

Звенигородка. Також результатів дисертаційних досліджень впроваджено в навчальний процес в Одеській державній академії будівництва та архітектури.

8. Викладені у даному розділі результати досліджень були опубліковані у роботах [185, 193, 194].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено модифіковані фібробетони для жорстких дорожніх покриттів, які за рахунок використання раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатора полікарбоксилатного типу мають необхідну для доріг відповідної категорії міцність та підвищену довговічність.

2. Досліджено сумісний вплив базальтової фібри і повітровтягуючої добавки на властивості бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Встановлено, що при використанні дисперсного армування базальтовою фіброю В/Ц сумішей несуттєво (на 1%) підвищується для забезпечення необхідної рухомості. Введення добавки MICROPORAN знижує В/Ц бетонних та фібро бетонних сумішей на 3,6-4.1%. При використанні фібри BAUCON®-bazalt у кількості 0,75-1 кг/м<sup>3</sup> міцність бетону на стиск підвищується на 13-24%, міцність на розтяг при згині зростає на 21-29%, морозостійкість підвищується на рівень до 100 циклів і на 14-15% знижуються стиранисть.

3. Застосування повітровтягуючої добавки MICROPORAN знижує середню густину бетонів і фібробетонів на 1,9-5,4%, міцність на стиск на 2-21%, підвищує стиранисть на 2-7%, але майже не впливає на міцність бетонів на розтяг при згині. При використанні повітровтягуючої добавки у кількості 0,05% від маси цементу морозостійкість бетонів і фібробетонів не змінюється, при використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,15% для бетону без дисперсного армування марка за морозостійкістю підвищується з F200 до F300. Тобто застосування повітровтягуючої добавки для досліджених бетонів і фібробетонів має обмежену ефективність. Натомість дисперсне армування базальтовою фіброю забезпечує комплексний позитивний ефект – зростає міцність, морозостійкість та зносостійкість бетону.

4. Із застосуванням методів планування експерименту досліджено вплив кількості портландцементу, базальтової фібри і суперпластифікатору полікарбоксилатного типу на властивості фібробетонів жорстких дорожніх покриттів та бетонних сумішей. Встановлено, що найменше В/Ц сумішей рівної

рухомості досягається при введенні суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G у кількості 0,8-0,9% від маси цементу. При підвищенні кількості портландцементу у складі фібробетонів з 290 до 350 кг/м<sup>3</sup> їх міцність на стиск і на розтяг при згині очікувано зростає. Також на 50-100 циклів зростає морозостійкість бетонів та на 14-17% знижується стиранисть.

5. За рахунок збільшення кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м<sup>3</sup> міцність на розтяг при згині фібробетонів дорожніх покриттів у віці 3 діб зростає на 0,5-0,6 МПа, у віці 28 діб – на 0,7-0,8 МПа, морозостійкість зростає приблизно на 50 циклів, стиранисть бетонів знижується на 11-16%. При цьому міцність на стиск не змінюється. Підвищення кількості суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9-1% викликає зниження В/Ц, за рахунок чого міцність на стиск фібробетонів зростає у віці 3 діб на 2,3-2,6 МПа, у віці 28 діб – на 3,2-3,8 МПа, морозостійкість зростає на рівень до 50 циклів. При цьому зміна кількості суперпластифікатору в межах факторного простору експерименту не впливає на міцність фібробетонів на розтяг при згині та стиранисть. Завдяки застосуванню раціональної кількості базальтової фібри і суперпластифікатору отримано фібробетони з міцністю на стиск від 40 до 55 МПа та з міцністю на розтяг при згині від 4,5 до 6 МПа в залежності від кількості цементу у складі.

6. З використанням комплексу отриманих ЕС-моделей та методу багатокритеріальної оптимізації обрано оптимальні склади фібробетонів жорсткого дорожнього покриття для доріг різних категорій, які мають найменшу собівартість при забезпеченій необхідній міцності та підвищеній довговічності.

7. Результатів дисертаційних досліджень впроваджено в виробництво на дочірньому підприємстві «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»», а також в навчальний процес в Одеській державній академії будівництва та архітектури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гамеляк І.П., Островерхий І.Г., Мороз В.С. Історія та перспективи будівництва цементобетонних покриттів автомобільних доріг та аеродромів в Україні/ *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 2019, №106, С.60-76.
2. China economic database: веб-сайт. URL: <https://www.ceicdata.com/en/china/highway-length-of-highway/cn-highway-length-of-highway-paved-common-cement-concrete> (дата звернення 10.01.2024).
3. Ready-mixed and returned concrete solution association: веб-сайт. URL: <https://rrcs-association.or.jp/en/cn4/pg241.html> (дата звернення 10.01.2024).
4. Muench S.T., Pierce L., Uhlmeyer J., Anderson K. A brief history of long-life wsdot concrete pavements, Report № WA-RD 744.2. Washington State Transportation Center. 2010. 25 p.
5. Kathleen Hall, Dan Dawood, Suneel Vanikar, Robert Tally. Long-life Concrete Pavements in Europe and Canada, Report № WHRP 0092-15-08. Wisconsin Department of Transportation. 2007. 81 p.
6. Concrete construction magazine: веб-сайт. URL: [https://www.concreteconstruction.net/projects/infrastructure/concrete-pavement-facts\\_o](https://www.concreteconstruction.net/projects/infrastructure/concrete-pavement-facts_o) (дата звернення 10.01.2024).
7. The Times Recorder (Zanesville), April 24, May 1, 1966. See also Wayne E. Fuller, "The Ohio Road Experiment, 1913-1916," Ohio History, LXXIV (1965), 13-28.
8. Roger D. Till, Randy Van Portfliet. European Concrete Pavement Tour. Michigan Department of Transportation, Research Report № R-1462. Michigan department of transportation. 1992. 20 p.
9. Laszlo Gaspar. Concrete highway pavement construction in Europe. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> central European congress on concrete engineering*. 2006. P. 322-328.

10. Солодкий С. Й. Бетонні дорожні та аеродромні покриття : навч. посіб. / С. Й. Солодкий, С. М. Толмачов; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2016. 132 с.
11. Офіційний сайт державного агентства автомобільних доріг України: веб-сайт. URL: <https://adu.com.ua/> (дата звернення 10.01.2024).
12. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. 71 с.
13. ДСТУ 8858:2019. Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови. [Чинний від 2020-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2019. 31 с.
14. Офіційний сайт державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України: веб-сайт. URL: <https://restoration.gov.ua/> (дата звернення 10.01.2024).
15. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України: веб-сайт. URL: <https://mtu.gov.ua/> (дата звернення 10.01.2024).
16. Крижановський В.О., Кровяков С.О., Заволока М.В., Шевченко В.В., Андреева О.А., Софіяник А.М. Використання досвіду будівництва монолітного цементобетонного покриття злітно-посадкової смуги аеропорту «Одеса» при розробці нового вітчизняного стандарту на влаштування аеродромів/ *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 2021, №85, С.100-109. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2021-85-100-109>
17. Вікіпедія. Автошлях Н 14. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Автошлях\\_Н\\_14](https://uk.wikipedia.org/wiki/Автошлях_Н_14) (дата звернення 27.12.2023)
18. Гамеляк І. П., Шургая А. Г., Дмитриченко А. М. Дорожній цементобетон для будівництва місцевих доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2019, №106, С. 12-23.
19. 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. Выпуск 52. С. 176-182.

20. Солодкий С. Й., Турба Ю. В., Воробець А. В., Женчак Р. В. Діагностика стану та ремонтні заходи для реабілітації ділянки бетонного покриття ЗПС міжнародного аеропорту «Львів» ім. Данила Галицького. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 73. С. 105-112.

21. Гамеляк І. П., Дмитриченко А. М., Кривобок О. В. Контроль якості цементобетонних покриттів автомобільних доріг на об'єктах великого будівництва. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2022. №112. С. 33-45. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2022-112-033-045>

22. Выровой В. Н., Суханов В. Г., Коробко О. А., Загорчменная Н. О., Непомящий А. Н. Сопротивление морозному разрушению бетонов для дорожного покрытия. *Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры*. 2015. Выпуск 58. С. 88-95.

23. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарницький Ю. В. Розрахунок складу дорожнього бетону з нормованою міцністю та морозостійкістю. *Технології бетонів*. 2013, №1, С. 26-29.

24. Дворкін Л. Й. Бетони спеціального призначення: навчальний посібник. Київ: Кондор. 2018. 354 с.

25. Гамеляк І. П., Шургая А. Г., Якименко Я. Н., Чиженко Н. П. Математичні моделі властивостей високоміцних бетонів для дорожнього будівництва. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2017, №169, С. 103-110. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084>

26. Попруга П. В., Шейніч Л. А., Миколаєць М. Г. Будівництво автомобільної естакади (віадук) термінального комплексу «D» ДМА «Бориспіль» м. Київ. *Мости та тунелі*. 2012. №3. С. 142-146.

27. ДСТУ Б В.2.7-176:2008 Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови. [Не чинний від 2024-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 109 с.

28. Дворкін Л.Й. Оптимізація складу високоміцного сталевібробетону. *Строительные материалы и изделия*. 2016. № 2-3. С. 38-41.
29. Марущак У. Д., Саницький М. А., Королько С. В. Наномодифіковані швидкотверднучі бетони, армовані дисперсними волокнами. *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2017. № 877. С. 137-143.
30. Деревянко В. Н., Шаповалова О. В., Кондратьева Н. В., Максименко А. А. Дисперсное армирование – способ повышения прочности изделий. *Вісник ПДАБА*. 2015. Вип. 204. С. 10-19.
31. Толмачев С. Н., Беличенко Е. А. Влияние вовлеченного воздуха на свойства дорожных бетонов и фибробетонов. *Строительные материалы*. 2017. № 1-2. С. 68-72.
32. Chajec A., Krzywiński K., Sadowski L., Ostrowski K. The influence of polypropylene fibres on the properties of fresh and hardened concrete. *Technical transactions in civil engineering*. 2019. 5. P.71-82.  
<https://doi.org/10.4467/2353737XCT.19.055.10579>
33. Guerini V., Conforti A., Plizzari G., Kawashima S. Influence of Steel and Macro-Synthetic Fibers on Concrete Properties. *Fibers*, 2018, 6(3), 47.  
<https://doi.org/10.3390/fib6030047>
34. Ушеров-Маршак А. В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы. 2006. № 10. С. 8-13.
35. ACI Committee 544. Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI 544.1R-96 (reapproved 2009). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
36. Davenport B., Voigt G., Deem P. A Concrete Legacy, The Past, Present, and Future of the American Concrete Pavement Association. 2014, P. 128.
37. Henschen, J. A. Amirkhanian, J. Roesler, and D. Lange. Field Evaluation of Alternative Isolation Joints at O'Hare International Airport. 2014 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference: Innovations in Airport Safety and Pavement Technology, August 5–7, Galloway, NJ.

38. Ozyildirim C., Moen C., Hladky S. Investigation of Fiber-Reinforced Concrete for Use in Transportation Structures, Research Report № FHWA/VTRC 97-R15. Virginia Transportation Research Council. 1997. 15 p.
39. 150M-20. Standard Specification for Portland cement. American Society for Testing and Materials, 2020. 10 p.
40. Smits J. Fiber-reinforced polymer bridge design in the Netherlands: Architectural challenges toward innovative, sustainable, and durable bridges. *Engineering*. 2016. 2(4) P. 518–527. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.004>
41. Alampalli S., Kunin J. Load testing of an FRP bridge deck on a truss bridge. *Appl. Compos. Mater.* 2003. 10(2), P.85–102. <https://doi.org/10.1023/A:1022885728627>
42. Canning L., Luke S. Development of FRP bridges in the UK—an overview. *Adv. Struct. Eng.* 2010. 13(5), P. 823–835. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.5.823>
43. A. Amirkhanian J. Roesler. Overview of Fiber-Reinforced Concrete Bridge Decks. Report In Trans Project 15-532 Iowa Department of Transportation, 2019. 37 p.
44. Ashis S. Daharte, Shrinivas R. Suryawanshi. Experimental and Analytical Investigation of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bridge Deck Structures. *IJRASET*. 2019, Vol.7 (9), P. 469-454. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.9065>
45. Deng Z., Liu X., Chen P., et al. Basalt-polypropylene fiber reinforced concrete for durable and sustainable pipe production. Part 1: Experimental program. *Structural Concrete*. 2022. 23. P. 311–327. <https://doi.org/10.1002/suco.202000759>
46. BS EN 197-1:2011; Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements. British Standard Institution: London, UK, 2011.
47. Wilson A., Abolmaali A. Performance of Synthetic Fiber-Reinforced Concrete Pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2014. 5(3), 04014002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000166](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000166)
48. Synthetic fiber reinforced concrete pipe. Texas Department of Transportation, 2017. 5 p.

49. Zeng G., Geng P., Guo X., Li P., Wang Q., Ding T. An anti-fault study of basalt fiber reinforced concrete in tunnels crossing a stick-slip fault. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021. 148, 106687. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106687>

50. Mishutin A., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Chintea L. Fiber-reinforced concrete for rigid road pavements modified with polycarboxylate admixture and metakaolin. *Electronic Journal of the faculty of civil engineering Osijek - e-GFOS*. 2021. Vol. 12. No.23. P. 1-10. <https://doi.org/10.13167/2021.23.1>

51. ДСТУ Б В.2.7-47-96. Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги. [Чинний від 1997-04-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 1996. 9 с.

52. Толмачов С. Н., Беліченко О. А., Захаров Д. С. Підвищення властивостей дорожніх бетонів введенням поліпропіленової фібри. *Будівельні матеріали та виробы*. 2016. № 1. С. 76-79.

53. Толмачов С. Н., Беліченко О. А., Дядюшко Р. В. Вплив поліпропіленової фібри X-Mesh на властивості дорожнього бетону. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. № 198. С. 58-65.

54. Kos Z., Kroviakov S., Mishutin A., Poltorapovlov A. An Experimental Study on the Properties of Concrete and Fiber-Reinforced Concrete in Rigid Pavements. *Materials*. 2023, 16 (17). 5886. <https://doi.org/10.3390/ma16175886>

55. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю. Частина II. *Вісник національного університету «Львівська Політехніка»*. 2015. № 823. С. 298-302.

56. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Підвищення тріщиностійкості дисперсно-армованих поліпропіленовою фіброю бетонів технологічними чинниками. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. № 66. С. 99-105.

57. Julon L., Zarate B., Silvera M., Campos F., Hedulian D. Evaluation of the influence of polypropylene fiber on the flexural strength of rigid pavements. *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*. Buenos Aires, 2023. <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.491>

58. Kos Z., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Rey J. C. Strength, Frost Resistance, and Resistance to Acid Attacks on Fiber-Reinforced Concrete for Industrial Floors and Road Pavements with Steel and Polypropylene Fibers. *Materials*. 2022, 15 (23). 8339. <https://doi.org/10.3390/ma15238339>

59. James E. Shoenberger, Joe G., Tom. Polypropylene fibers in Portland cement concrete pavements, Research Report № DOT/FAA/RD-92/9. US Army Engineer Waterways Experiment Station Geotechnical Laboratory. 1992. 116 p.

60. Achilleos C., Hadjimitsis D., Neocleous, K., Pilakoutas, K., Neophytou, P.O., Kallis S. Proportioning of Steel Fibre Reinforced Concrete Mixes for Pavement Construction and Their Impact on Environment and Cost. *Sustainability*. 2011, 3. P.965–983. <https://doi.org/10.3390/su3070965>

61. Frazão C.M.V., Barros J.A.O., Camões A., Alves A., Rocha L. Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete. *Cem. Concr. Res.* 2016, 79. P.112–122 <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.005>

62. Jianqiao Y., Hongxia Q., Geifei Z., Xinke W. Research on damage and deterioration of fiber concrete under acid rain environment based on GM (1,1)-Markov. *Materials*. 2021, 14, 6326. <https://doi.org/10.3390/ma14216326>

63. Huber B., Hilbig H., Drewes J.E., Müller E. Evaluation of concrete corrosion after short- and long-term exposure to chemically and microbially generated sulfuric acid. *Cem. Concr. Res.* 2017, 94, P.36–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.01.005>

64. Abul Bashar Emon Md., Manzur T., Salehin Sharif Md. Suitability of locally manufactured galvanized iron (GI) wire fiber as reinforcing fiber in brick chip concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2017, 7, P.217-227 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.08.003>

65. Fan L., Meng, W., Teng L., Khayat K. H. Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete. *Composites Part B*. 2019, 177, 107445 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107445>
66. Naidu Gopu G., Joseph S.A. Corrosion Behavior of Fiber-Reinforced Concrete—A Review. *Fibers*. 2022, 10 (5),38. <https://doi.org/10.3390/fib10050038>
67. Cui L., Gao X., Hang M., Chen T. Comparative Studies on Steel Corrosion Resistance of Different Inhibitors in Chloride Environment: The Effects of Multi-Functional Protective Film. *Applied science*. 2023, 13 (7), 4446. <https://doi.org/10.3390/app13074446>
68. Ngo T. T., Tran N. T., Kim D. J., Pham T. C. Effects of corrosion level and inhibitor on pullout behavior of deformed steel fiber embedded in high performance concrete. *Construction and building materials*. 2021, 280, 122449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122449>
69. Wu F., Yu Q., Chen F. Effects of steel fibre type and dosage on abrasion resistance of concrete against debris flow. *Cement and concrete composites*. 2022, 134, 104776. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104776>
70. Wang G., Zhang J., Li F., Xin M., Zhu J., Lu X., Cheng X., Zhang L. Enhancement of Alkali Resistance of Glass Fibers via In Situ Modification of Manganese-Based Nanomaterials. *Materials*. 2023, 16 (16), 5663. <https://doi.org/10.3390/ma16165663>
71. Tahir H., Khan M. B., Shafiq N., Radu D., Nyarko M. H., Waqar A., Almujiyah H. R., Benjeddou O. Optimisation of Mechanical Characteristics of Alkali-Resistant Glass Fibre Concrete towards Sustainable Construction. *Sustainability*. 2023, 15 (14), 11147. <https://doi.org/10.3390/su151411147>
72. Paktiawal A., Alam M. Alkali-resistant glass fiber high strength concrete and its durability parameters. *Materials today: Proceedings*. 2023, 47 (14), P.4758-4766. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.668>



73. Ohigashi T. Durability test method for alkali-resistant glass fiber used as reinforcing element in cement. *Cement and concrete research*. 1986, 16 (3), P.383-393. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90114-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90114-6)

74. Xiachun Q., Xiaoming L., Xiaopei C. The applicability of alkaline-resistant glass fiber in cement mortar of road pavement: Corrosion mechanism and performance analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017, 10 (6), P.536-544. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.06.003>

75. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M. S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Study in Construction Materials*. 2020, 13, e00429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>

76. Jamwal W., Singh P. Use of glass fiber in pavement quality concrete slab. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2018, 4 (2), P.1949-1954.

77. Benmokrane B., Ahmed E. A., Montaigu M., Thebeau D. Performance of Glass Fiber-Reinforced Polymer-Doweled Jointed Plain Concrete Pavement under Static and Cyclic Loadings. *ACI Structural Journal*. 2014, 111 (2), P.331-341.

78. Jeffery Roesler, Amanda Bordelon, Alexander S. Brand, Amren Amir Khanian. Fiber-reinforced concrete for pavement overlays: technical overview, Report № 15-532. National concrete pavement technology center, 2019. 96 p.

79. ASTM C1666/C1666M-2015. Standard Specification for Alkali Resistant (AR) Glass Fiber for GFRC and Fiber-Reinforced Concrete and Cement, 2015. 4 p.

80. Yildizel S. A., Timur O., Ozturk A. U. Abrasion Resistance and Mechanical Properties of Waste-Glass-Fiber-Reinforced Roller-compacted Concrete. *Mechanics of composite Materials*. 2018, 58, P.251-256. <https://doi.org/10.1007/s11029-018-9736-6>

81. Tiberti G., Mudadu A., Barragan B., Plizzari G. Shrinkage Cracking of Concrete Slabs-On-Grade: A Numerical Parametric Study. *Fibers*. 2018, 6(3), 64. <https://doi.org/10.3390/fib6030064>

82. Monazami M., Sharma A., Gupta R. Evaluating performance of carbon fiber-reinforced pavement with embedded sensors using destructive and non-destructive testing. *Case Study in Construction Materials*. 2022, 17, e01460. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01460>
83. Lee J. S., Rhee I. Functional Properties of a Pitch-Based Carbon Fiber–Mortar Composite as a Thin Overlay for Concrete Pavement. *Materials*. 2019, 12(17), 2753. <https://doi.org/10.3390/ma12172753>
84. Li Q., Li Y., Han Y. Application of Cement-Based Carbon Fiber Material in Construction of Building Durability. *International Journal of Analytical Chemistry*. 2022, 9. <https://doi.org/10.1155/2022/3562209>
85. Chen P. W., Chung D. D. L. Low-drying-shrinkage concrete containing carbon fibers. *Composites Part B: Engineering*. 1995, 27(3-4), P.269-274. [https://doi.org/10.1016/1359-8368\(95\)00020-8](https://doi.org/10.1016/1359-8368(95)00020-8)
86. Galao O., Baeza F. Z., Zornoza E., Garcés P. Self-heating function of carbon nanofiber cement pastes. *Mater. Constr.* 2014, 64, P.1-11. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.01713>
87. Chu H., Zhang Z., Liu Y., Leng J. Self-heating fiber reinforced polymer composite using meso/macropore carbon nanotube paper and its application in deicing. *Carbon*, 2014, 66, P.154-163. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.08.053>
88. Ji X., Ge Y., Li M., Wang L., Liu S. Preparation of carbon fiber conductive concrete and study on its mechanical and heating properties. *Journal of Materials research and technology*. 2023, 27, P.3029-3040. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.118>
89. Lai Y., Liu Y., Ma D. Automatically melting snow on airport cement concrete pavement with carbon fiber grille. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2014, 103, P.57-62. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.03.008>
90. Zhao H., Wu Z., Wang S., Zheng J., Che G. Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2011, 65, P.413-420. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.10.010>



91. Tavadi A. R., Naik Y., Kumaresan K., Jamadar N. I., Rajaravi C. Basalt fiber and its composite manufacturing and applications: An overview. *International journal of engineering, science and technology*, 2021, 13(4), P.50-56. <http://dx.doi.org/10.4314/ijest.v13i4.6>

92. Трефілов В. І., Махова М. Ф., Джигіріс Д. Д., Сергєєв В. П., Міщенко Є. С. та ін. Мінерально-сировинна база гірських порід України для виробництва волокон. Промисловість будівельних виробів. М.: НДІ Науково-технічної інформації та економіки промисловості будівельних матеріалів. 1992. 88 с.

93. Дворкін Л. Й., Бордюженко О. М., Ковальчук Т. В. Фібробетони з композиційним дисперсним армуванням. *Будівельні матеріали та вироби*, 2019, 1-2 (100), С.26-29.

94. Ковальчук Т. В. Високоміцний фібробетон із композиційним дисперсним армуванням: дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Рівне. нац. ун-т. водн. госп. та природокор, 2019. 211 с.

95. Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В., Бордюженко О. М. та ін. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія. Рівне: НУВГП. 2017. 331 с.

96. Бабяк І. П. Вплив базальтової фібри на властивості бетону для транспортного виробництва. *Містобудування та територіальне планування*, 2016, 61, С.128-135.

97. Турба Ю. В. Тріщиностійкість дисперсно-армованого бетону: дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Львів. Національний університет «Львівська політехніка». 2021. 143 с.

98. 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, 5(3), 103. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00359-y>

99. Sarkar A., Hajihosseini M. The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement. *Road materials and pavement design*, 2020, 21(6), P.1726-1737. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379>

100. Yu J., Yi Z., Zhang Z., Liu D., Ran J. The Effects of Hybrid Steel/Basalt Fibers on the Durability of Concrete Pavement against Freeze–Thaw Cycles. *Road materials and pavement design*, 2023, 16(22), 7137. <https://doi.org/10.3390/ma16227137>
101. Wu H., Xu X. Q., Kaewunruen S. Engineering, Mechanical and Dynamic Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete. *Materials*, 2023, 16(2), 623. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>
102. Yildizel S. A., Tayeh B. A., Uzun M. The evaluation of calcium carbonate added and basalt fiber reinforced roller compacted high performance concrete for pavement. *Case Study in Constructional Materials*, 2022, 17, e01293. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01293>
103. Mu Y. Xia H., Yan Y., Wang Z., Guo R. Fracture Behavior of Basalt Fiber-Reinforced Airport Pavement Concrete at Different Strain Rates. *Materials*, 2022, 15(20), 7379. <https://doi.org/10.3390/ma15207379>
104. Kabay N. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and building materials*, 2014, 50, P.95-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.040>
105. Branston J., Das S., Kenno S.Y., Taylor C. Influence of basalt fibres on free and restrained plastic shrinkage. *Cement and concrete composites*, 2016, 74, P.182-190. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.004>
106. Doroshenko O. Use of modified basalt fiber in transport construction. *Transport systems and technologies*, 2023, 42, P.58-68. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-42-5>
107. Дорошенко О. Вивчення властивостей дрібнозернистих цементобетонів із використанням пластифікаторів і базальтового волокна. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, 2023, 206, С.72-82. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296773>
108. Abbas W., Khan M.I., Mourad S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2018, 168, P.556–569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164>

109. Soulioti D. V., Barkoula N. M., Paipetis A., Matikas T. E. Effects of Fibre Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete. *Strain–Int. J. Exp. Mech.* 2009, 47, e535–e541.

<https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x>

110. 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.

111. 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.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.223>

112. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Будівельні матеріали. Настанова щодо застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах. [Чинний від 2010–04–01] Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 31 с.

113. Суханов В.Г., Выровой В.Н., Коробко О.А. Структура материала в структуре конструкции. Одесса: Полиграф, 2016. 244 с.

114. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Скрипник М. М. Комплексні пластифікуючі добавки для бетону на основі ефірів полікарбоксилатів. *Строительные материалы и изделия. Збірник наукових праць*. 2016. №. 1. С. 38-41.

115. Chen J. Zhu Y., Du W., Li M., Wang Y., Zhang C., Shi M., Xue B. Influence of Polycarboxylate Superplasticizer on the Properties of Cement-Fly Ash Cementitious Materials and Concrete. *Sustainability*, 2022, 14(20), 13440.

<https://doi.org/10.3390/su142013440>

116. Xun W. Wu C., Leng X., Li J., Xin D., Li Y. Effect of Functional Superplasticizers on Concrete Strength and Pore Structure. *Applied Sciences*, 2020, 10(10), 3496. <https://doi.org/10.3390/app10103496>

117. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Ніжин: Аспект-Поліграф, 2010. 228 с.
118. Alonso M. M. Palacios M., Puertas F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1), P.151-162.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.020>
119. Ilg M. Planc J. Synthesis and Properties of a Polycarboxylate Superplasticizer with a Jellyfish-Like Structure Comprising Hyperbranched Polyglycerols. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2019, 58(29). P.12913-12926.  
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02077>
120. Саницький М. А., Марущак У. Д., Кіракевич І. І., Мазурак Т. А. Особливо швидкотверднучі композиції для високофункціональних бетонів. *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2013. № 755. С. 385-390.
121. Саницький М. А., Марущак У. Д., Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції для високофункціональних бетонів. *Будівельні матеріали та вироби*. 2018. № 3-4. С. 28-31.
122. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона. М.: Инфра-Инженерия. 2017. 386 с.
123. Дорошенко Ю.М., Возный С.П. Практические меры по повышению долговечности цементобетонных покрытий для автомобильных дорог. *Дороги і мости*. 2015, №15. С.39-44.
124. Шевчук Г. Я., Собко Ю. М., Генсецький М. П., Гнип О. П., Чуб О. А. Застосування добавок полікарбоксилатного типу у виробництві дорожніх бетонів. *Будівельне виробництво*. 2017. 63(1). С. 62-66.
125. Kryzhanovskyi V., Kroviakov S., Zavoloka M. High-early strength concretes modified with polycarboxylate admixture on different cement types. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021, 1141 No. 012003.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1141/1/012003>

126. Саницький М. А., Позняк О. Р., Мазурак О. Т., Чемерис М. М. Бетони з комплексними модифікаторами нової генерації. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2004, С. 169-172.

127. Саницький М. А., Позняк О. Р., Кіракевич І. І., Русин Б. Г. Високофункціональні бетони на основі модифікаторів нової генерації. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2008, С. 197-197.

128. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Тунчик А. О., Гайдайчук Р. В. Ефективність полікарбосилатних суперпластифікаторів в золівмісних бетонах. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2018, С. 20-27.

129. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Скрипник М. М., Русин Б. Г. Проектування складів комплексних пластифікуючих добавок та бетонів з їх застосуванням. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2016, С. 36-44.

130. Chajec A., Sadowski L. The Effect of Steel and Polypropylene Fibers on the Properties of Horizontally Formed Concrete. *Materials*, 2020, 13, 5827. <https://doi.org/10.3390/ma13245827>

131. Al-Kharabsheh B. N., Arbili M. M., Majdi A., Alogla S. M., Hakamy A., Ahmad J., Deifalla A. F. Basalt Fibers Reinforced Concrete: Strength and Failure Modes. *Materials*, 2022, 15, 7350. <https://doi.org/10.3390/ma15207350>

132. Liu M., Hansen W. Freezing characteristics of air-entrained concrete in the presence of deicing salt. *Cem. Concr. Res.*, 2015, 74, P.10-18. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.015>

133. Du L., Folliard K. J. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2005. 35. P.1463–1471 <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026>

134. Kaufmann J.P. Experimental identification of ice formation in small concrete pores. *Cem. Concr. Res.* 2004. 34(8). P.421–1427. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.022>

135. Struble L.J., Jiang Q. Effects of air entrainment on rheology. *ACI Mater.* 2004. 6. P. 448–456.

136. Zhang X., Zhang H., Gao H., He Y., Jiang M. Effect of bubble feature parameters on rheological properties of fresh concrete. *Construction and building materials*. 2019. P.245–255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.088>

137. Topcu I. B., Atesin O., Uygunoglu T. Effect of High Dosage Air-Entraining Admixture Usage on Micro Concrete Properties. *EJENS*. 2017, 2(1), P.1–11. [https://www.researchgate.net/publication/321028052\\_Effect\\_of\\_High\\_Dosage\\_Air-Entraining\\_Admixture\\_Usage\\_on\\_Micro\\_Concrete\\_Properties](https://www.researchgate.net/publication/321028052_Effect_of_High_Dosage_Air-Entraining_Admixture_Usage_on_Micro_Concrete_Properties)

138. Marczewska J., Piasta W. The impact of air content on the durability of concrete under combined sulphate and freeze-thaw attack. *MATEC Web of Conferences*. 2018, 163, 05002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816305002>

139. Nagi M. Evaluating Air-entraining Admixtures for Highway Concrete. Evantson: Transportation Research Board. 2007. 49 p.

140. Aneta Nowak-Michta. Impact analysis of air-entraining and superplasticizing admixtures on concrete compressive strength. *9th International Conference on Materials Structure and Micromechanics of Fracture*. 2019. P. 77-82.

141. Толмачев С. Н., Бражник А. В. Снижение прочности бетона при введении воздухововлекающих добавок в бетонную смесь. *Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение*. Якутск: Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Амосова, 2014. С. 369-373.

142. Kalthori M., Ramezani pour A. A. Innovative air entraining and air content measurement methods for roller compacted concrete in pavement applications. *Construction and Building Materials*, 2021, 279, 122495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122495>

143. Whiting D. A., Nagi M. A. Manual on control of air content in concrete Skokie: Portland Cement Association. 1998. 42 p.

144. Солодкий С. Й., Гуняк О. М., Марків Т. Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2016. 98. С. 247-255.
145. Коробко О. О., Вировий В. М., Суханов В. Г. Стійкість бетонів при періодичних зовнішніх впливах. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2018. 181. С. 65-74.
146. Nowak-Michtha A. Salt Scaling Resistance of Variable w/c Ratio Air-Entrained Concretes Modified with Polycarboxylates as a Proper Consequence of Air Void System. *Materials*. 2022, 15(17), 5839. <https://doi.org/10.3390/ma15175839>
147. Spurina E., Sinka M., Ziemelis K., Vanags A., Bajare D. The Effects of Air-Entraining Agent on Fresh and Hardened Properties of 3D Concrete. *Composite Science*. 2022, 6(10), 281. <https://doi.org/10.3390/jcs6100281>
148. Blikharskyu Z., Markiv T., Turba Y., Hunyak O., Blikharskyu Y., Selejdak J. Mechanical and Fracture Properties of Air-Entrained FRC Containing Zeolitic Tuff. *Applied Sciences*. 2023, 13(16), 9164. <https://doi.org/10.3390/app13169164>
149. Толмачов С. М. Особливості повітроутягнення у дорожні бетони та фібробетони. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2017, 99, С. 67-76.
150. ВБН В.2.3-218-008-97 Проектирование и строительство жестких и с жесткими прослойками дорожных одежд. Изменение № 1. [Не действующий от 2017-04-01]. Издат. офіц. Киев: Государственное агентство автомобильных дорог Украины (УкрАвтоДор), 1997.
151. Дворкін Л. Й. Розрахункове прогнозування морозостійкості бетону при проектуванні його складів. *Будівельні матеріали та виробы*. 2018. 1-2(97). С. 14-20.
152. ДСТУ Б В.2.7-114-2002 Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань. [Чинний від 2002-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2002. 32 с.
153. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ, 2010. 43 с.



154. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. [Чинний від 2009-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2008. 38 с.

155. ДСТУ Б В.2.7-49-96. Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. [Чинний від 1997-04-01]. Вид. офіц. Київ, 1996. 9 с.

156. ДСТУ Б В.2.7-212:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стиранності. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ, 2010. 9 с.

157. Офіційний сайт ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна». Портландцемент ПЦ І-500Р-Н. URL: <https://www.dyckerhoff.com.ua/pc-i-500> (дата звернення 11.08.2023)

158. Захарченко Є. Бетони об'єктів транспортного призначення на основі цементів «Дікергофф цемент Україна» будуть мати високі експлуатаційні показники та довговічність. Бетон, 2018, №3, С. 20-21. URL: [http://kapstroy.kiev.ua/wp-content/uploads/2018/09/Beton\\_3\\_2018\\_all\\_web.pdf](http://kapstroy.kiev.ua/wp-content/uploads/2018/09/Beton_3_2018_all_web.pdf) (дата звернення 15.11.2023)

159. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2010. 15 с.

160. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. [Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2010. 28 с.

161. Офіційний сайт ТОВ «Стахема ЛЬВІВ-СЕРВІС». URL: <https://stachema.ua> (дата звернення 11.08.2023)

162. Офіційний сайт ТОВ «Баутех-Україна». BAUCON® Basalt. URL: <https://bautech.com.ua/product/baucon-basalt> (дата звернення 11.08.2023)

163. ДСТУ Б В.2.7-273:2011. Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови. [Чинний від 01.12.2012]. Вид. офіц. Київ, 2012. 5 с.

164. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2006. 116 с.



165. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.
166. Jeff Wu C. F., Hamada M.S. Experiments: Planning, Analysis, and Optimization. 2d ed., Wiley & Sons, 2009. 552 p.
167. 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.
168. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К.: Вища школа, 1989. 327 с.
169. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 91 с.
170. Толмачев С.Н., Солодкий С.Й. Факторы обеспечения долговечности дорожного цементного бетона. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2013, 52. С.275-280
171. Ziari H., Nayati P., Sobhani J. Air-entrained air field self-consolidating concrete pavements: strength and durability. International Journal of Civil Engineering. 2017, 15, P. 21–33 <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0104-4>
172. Lai Y., Liu Y., Wang P., Ma D.X., Guo B., Sun K., Hou S. Effect of aircraft deicer on deicer-scaling resistance and frost resistance of airport pavement concrete. Journal of Physics: Conference Series. 2020, 1605, 012178, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1605/1/012178>
173. Pham L.T., Cramer S.M. Effects of air-entraining admixtures on stability of air bubbles in concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 2021, 33 (4), 04021018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003628](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003628)
174. Толмачов С.М., Бєліченко О.А., Захаров Д.С. Дослідження впливу повітроутягування на міцність дорожніх бетонів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, № 68, С.96-101

175. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Проектування складів бетонів. Рівне: НУВГП, 2015. 353 с.

176. Tolegenova A., Skripiunas G., Rishko L., Akmalaiuly K. Both plasticizing and air-entraining effect on cement-based material porosity and durability. *Materials*, 2022, 15, 4382. <https://doi.org/10.3390/ma15134382>

177. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Grynyova I. Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair. *Applied Sciences*, 2022, 12(3), 1174. <https://doi.org/10.3390/app12031174>

178. Толмачев С.Н., Кондратьева И.Г., Чугуенко А.Н., Гринченко Р.О. Взаимосвязь истираемости и морозостойкости дорожных бетонов. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2005, №30, С. 52-55.

179. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А., Бражник А.В. Способы защиты дорожных бетонов при действии агрессивных факторов. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016, 62, С. 176-181

180. Kroviakov S., Shestakova L. Influence of basalt fiber and air-entraining admixture on the properties of rigid concrete pavement. *Romanian Journal of Materials*. 2023, 53 (2), pp. 170-175.

181. Кровяков С. О., Шестакова С. Є. Міцність, зносостійкість і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю та повітровтягуючою добавкою. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 134–148. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.144>

182. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Дослідження властивостей фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю і повітровтягувальною добавкою. *Збірка тез доповідей 77-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса: ОДАБА, 2021. С.171

183. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Вплив базальтової фібри і повітровтягувальної добавки на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів.

Збірка тез доповідей 78-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2022. С. 202

184. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Вплив повітровтягуючої добавки та базальтової фібри на міцність і довговічність бетонів жорстких дорожніх покриттів. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Моделювання та оптимізація будівельних композитів». Одеса: ОДАБА, 2022, С. 62-66

185. Кровяков С. О., Шестакова С. Є. Міцність, зносостійкість і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю та повітровтягуючою добавкою. Дороги і мости. Київ, 2023. Вип. 28. С. 134–148. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.144>

186. Jiang S., Wang Y., Wang X., Liu Z., Liu Q., Li C., Li P.. Numerical analysis on the structure design of precast cement concrete pavement slabs. Coatings. 2022, 12, 1051. <https://doi.org/10.3390/coatings12081051>

187. Стьожка В.В. Підвищення довговічності цементобетонного покриття доріг за рахунок застосування гідрофобних хімічних добавок. Дороги і мости, 2020, 22, С. 128-137. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.128>.

188. Толмачов С.М., Беліченко О.А., Толмачов Д.С., Даценко В.М., Марченко М.Є. Властивості дорожніх бетонів із сумішей різної рухомості. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 2020, 14, С. 160-168. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2020-4\(14\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2020-4(14)-16).

189. Добролюбов Г., Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. М.: Стройиздат, 1983. 212 с.

190. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. Одесса: ТЕС, 2010. 176 с.

191. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев`юк І.М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони: Монографія. Львів: Видавництво ТОВ «Простір-М», 2021. 206 с.

192. Taylor H. Chemistry of cement. M.: Mir, 1996. 560 p.
193. Kroviakov S.O., Shestakova L.E. Durability of rigid pavement concrete reinforced with basalt fiber. Сучасне будівництво та архітектура, 2024, №7, С.109-117. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-7-109-117>
194. Кровяков С.О., Ігнатенко А. В., Шестакова Л.Є., Заволока М.В. Пошук оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття з використанням експериментально-статистичних моделей. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. № 1. С. 6-16.

**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. Kroviakov S.O., Shestakova L.E. Durability of rigid pavement concrete reinforced with basalt fiber. *Сучасне будівництво та архітектура*, 2024, №7, С.109-117. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-7-109-117>

2. Кровяков С.О., Ігнатенко А. В., Шестакова Л.Є., Заволока М.В. Пошук оптимальних складів фібробетонів жорсткого дорожнього покриття з використанням експериментально-статистичних моделей. *Механіка та математичні методи*, 2024. Т. VI. № 1. С. 6-16. <http://mmm-journal.com.ua/pages/archive.php>

3. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Вплив базальтової фібри і суперпластифікатору на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів. *Сучасне будівництво та архітектура*, 2023, №6, С.99-108. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-99-108>

4. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Міцність, зносостійкість і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю та повітровтягуючою добавкою. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 144–158. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.144>

*Статті у наукових періодичних виданнях інших держав*

5. Kroviakov S., Shestakova L. Influence of basalt fiber and air-entraining admixture on the properties of rigid concrete pavement. *Romanian Journal of Materials* 2023, 53 (2), pp. 170-175. <https://solacolu.chim.upb.ro/pg170-175.pdf>  
(Індексується наукометричними базами Scopus i Web of Science)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Вплив повітровтягуючої добавки та базальтової фібри на міцність і довговічність бетонів жорстких дорожніх покриттів: матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Моделювання та оптимізація будівельних композитів». Одеса: ОДАБА, 2022, С. 62-66

7. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Вплив базальтової фібри і повітровтягувальної добавки на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів: збірка тез доповідей 78-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2022. С. 202

8. Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Дослідження властивостей фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю і повітровтягувальною добавкою: збірка тез доповідей 77-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2021. С.171

**Відомості про апробацію результатів дисертації:**

- 77-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 13-14 травня 2021 р. – очна участь);

- 78-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 19-20 травня 2022 р. – очна участь);

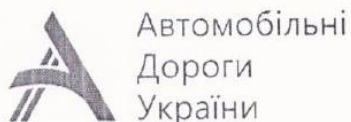
- міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання та оптимізація будівельних композитів». (Україна, м. Одеса, 17-18 листопада 2022 р. – дистанційна участь);

- 79-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 18 травня 2023 р. – очна участь);

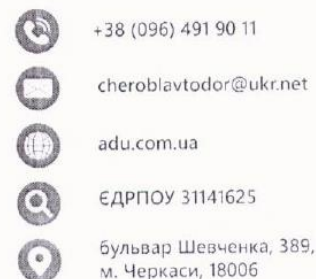
- V міжнародна науково-практична конференція «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (Україна, м. Одеса, 21-23 вересня 2023 р. – дистанційна участь).

**Додаток Б.**  
**Акти впровадження результатів досліджень**





Автомобільні  
Дороги  
України



+38 (096) 491 90 11

cheroblavtodor@ukr.net

adu.com.ua

ЄДРПОУ 31141625

бульвар Шевченка, 389,  
м. Черкаси, 18006

**ДОЧІРНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«ЧЕРКАСЬКИЙ ОБЛАВТОДОР»  
ВАТ «ДАК «АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ УКРАЇНИ»**

№ 109/03

«26» 02 2024р

### Акт

про впровадження результатів наукових досліджень

Цей акт підтверджує, що результати наукових досліджень аспірантки Одеської державної академії будівництва та архітектури Шестакової Любові Євгенівни, отримані в рамках дисертаційної роботи за темою «Модифіковані фібробетони з базальтовою фіброю для жорстких дорожніх покриттів», впроваджені у ДП «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України».

Надані рекомендації щодо складів фібробетонів жорстких покриттів використовувалися при влаштуванні покриття в процесі капітального ремонту автомобільної дороги загального користування державного значення Р-04, Київ – Фастів – Біла Церква -Звенигородка , км 212+220 – км 223+070, Звенигородського району, Черкаської області у 2021-2022рр.

Акт не має фінансової складової і засвідчує використання результатів наукових досліджень.

Т.в.о. директора



Андрій ІГНАТЕНКО



## МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

## ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65052, тел./факс: (048) 723-69-04, тел. (048) 723-43-53,

e-mail: list@odaba.edu.ua, веб-сайт: www.odaba.edu.ua, код ЄДРПОУ 02071033

13.03.2024 № 08-23-332

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

Г

Г

## ДОВІДКА

## про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Видана Шестаковій Любові Євгенівні, здобувачці вищої освіти ступеня доктора філософії 4-го року навчання за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, що дисертаційне дослідження за темою «Модифіковані фібробетони з базальтовою фіброю для жорстких дорожніх покриттів», яке містить нові науково обґрунтовані результати в галузі виробництва матеріалів для дорожнього будівництва, впроваджене у освітній процес Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Окремі наукові результати Л.Є. Шестакової використовуються при підготовці магістрів спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми» у методичних матеріалах освітніх компонентів «Наукові основи довговічності в будівництві та експлуатації автомобільних доріг та аеродромів» і «Ресурсозбереження та новітні технології у будівництві автомобільних доріг та аеродромів».

Також результати досліджень Л.Є. Шестакової були використані при підготовці дипломних робіт магістрів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, які проходили підготовку за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми».

Проректор з НПП

Ірина АЖАМАН