

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Крижановський Віталій Олександрович

УДК 691.32


ДИСЕРТАЦІЯ
МОДИФІКОВАНІ БЕТОНИ І ФІБРОБЕТОНИ ДЛЯ ВЛАШТУВАННЯ ТА
РЕМОНТУ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ І АЕРОДРОМНИХ 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


Крижановський В.О.

Науковий керівник:

Кровяков Сергій Олексійович, доктор технічних наук, доцент

АНОТАЦІЯ

Крижановський В.О. Модифіковані бетони і фібробетони для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Одеська державна академія будівництва та архітектури – Одеса, 2022.

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

У *першому розділі* проаналізовано досвід використання бетону і фібробетону для влаштування та ремонту дорожніх і аеродромних покриттів. Показано, що жорсткі покриття активно використовуються в США, Європі, Китаї та інших країнах. В Україні до 2040 р. планується збільшення частки жорстких покриттів доріг до 30 %. Переваги бетонних покриттів полягають у їх стійкості до колеусування, високій міцності на розтяг при згині та морозостійкості при низькій стираності.

Описано основні дефекти і пошкодження жорстких дорожніх та аеродромних покриттів та причини їх виникнення. Показано, що у якості ремонтного матеріалу для жорстких покриттів використовуються швидкотвердіючі бетони і фібробетони, зокрема зі сталеву фібру. Проаналізовано особливості складів та властивості бетонів і фібробетонів для ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів. Описано досвід використання модифікаторів і дисперсного армування в швидкотвердіючих бетонах дорожніх покриттів.

Сформульовано *робочу гіпотезу* роботи. Найбільш ефективними методами досягнення високої ранньої міцності одночасно з високою зносостійкістю, тріщиностійкістю і морозостійкістю бетону для ремонту та влаштування жорстких покриттів є використання сучасних суперпластифікаторів,

прискорювачів твердіння та дисперсного армування. Також за рахунок раціонального підбору складу сумішей з поєднанням модифікаторів та дисперсного армування можливо зниження усадки матеріалу, що позитивно відобразиться на його адгезії. Довговічність бетонів для влаштування дорожніх і аеродромних покриттів має бути забезпечена з урахуванням умов експлуатації. Для ремонтних матеріалів довговічність має задовольняти певні обґрунтовані критерії. Згідно регламентуючих документів більшості країн достатньо, щоб ремонтний матеріал мав строк служби 4-5 років. У той же час показники ранньої міцності на стиск і розтяг при згині регламентуються кожним підрядником та замовником окремо, але вони мають набувати значень, які будуть не менше проектних вимог до існуючого «старого» покриття доріг.

Виходячи з робочої гіпотези та спираючись на проведений аналіз технічної літератури, була сформульована *мета роботи*: розробка високоміцних швидкотвердіючих бетонів для ремонту і влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів з забезпеченою довговічністю за рахунок використання сталеві анкерної фібри, суперпластифікатора і прискорювача твердіння.

У *другому розділі* наведено характеристики використаних матеріалів, методику і схему проведення досліджень. На першому етапі роботи було проведено порівняння властивостей бетонів на різних типах цементу. На другому етапі проводились пошукові дослідження фізико-механічних характеристик дисперсно-армованих бетонів з використанням поліпропіленової фібри. На третьому етапі на основі оптимальних складів бетонних сумішей з використанням цементів ПЦ II/A-III-500 і ПЦЦ IV/A-500 P досліджувався вплив кількості пластифікатора MasterGlenium SKY 608 на структуру і фізико-механічні характеристики бетону. На четвертому етапі досліджувався вплив метакаоліну на міцність, морозостійкість, стиранисть та усадку бетонів. П'ятий етап присвячено вивченню властивостей фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів. Шостий етап – це впровадження у виробництво ремонтних складів сталеві фібробетонів з високою ранньою міцністю.

Третій розділ містить результати перших чотирьох етапів роботи і присвячений розробці складів та дослідженню властивостей високофункціональних бетонів для ремонту та влаштування жорстких покриттів.

У результаті порівняння властивостей бетонів на різних типах цементу (ССПЦ400-Д0, ПЦ-П/А-П-500 Р-Н, ПЦЦ IV/А-500 Р, ПЦ П/А-Ш-500) встановлено, що бетони на основі ПЦ-П/А-П-500 Р-Н і ПЦ П/А-Ш-500 забезпечують кращу ранню міцність, що важливо для дорожніх і аеродромних покриттів. З врахуванням ситуації на ринку України у якості основного в'язучого обрано ПЦ П/А-Ш-500.

Проведені дослідження властивостей фібробетонів з поліпропіленовою фіброю показали обмежену ефективність даного волокна в бетонах для влаштування і ремонту жорстких покриттів.

Досліджено вплив суперпластифікатора полікарбоксилатного типу MasterGlenium SKY 608 на міцність і структуру бетонів на цементах ПЦ П/А-Ш-500 і ПЦЦ IV/А-500. Встановлено, що для бетонів на обох типах цементу раціональною є кількість добавки 1,2% від маси в'язучого. На основі портландцементу ПЦ П/А-Ш-500 отримано бетон з марочною міцністю 85,6 МПа та міцністю у віці 3х діб 64,1 МПа. На основі цементу ПЦЦ IV/А-500 Р отримано бетон міцністю 64,1 МПа з міцністю у віці 3х діб 37,0 МПа. Рентгенофазовий аналіз підтвердив позитивну роль полікарбоксилатної добавки при структуроутворенні бетону.

Досліджено вплив активної мінеральної добавки метакаоліну на властивості модифікованого добавкою MasterGlenium SKY 608 бетону для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів. Встановлено, що заміна до 30 кг/м³ цементу метакаоліном не викликає покращення фізико-механічних характеристик бетонів: морозостійкість і зносостійкість бетону не змінюється, міцність несуттєво знижується. Усадка бетонів з метакаоліном завдяки підвищенню В/Ц суміші зростає. Показано, що з врахуванням вартості метакаоліну на ринку України на сьогодні не можна

визнати раціональним застосування цього додаткового компонента в бетонах жорстких дорожніх і аеродромних покриттів. Але при підсиленні в нашій країні екологічних вимог щодо вуглецевого сліду, а також у разі значного подорожчання енергоресурсів, які витрачаються для виробництва клінкеру, використання пуцоланових активних мінеральних добавок в бетонах дорожніх покриттів буде більш доцільним.

Четвертий розділ присвячено дослідженням властивостей фібробетонів для глибинного ремонту (full-depth repair) та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів (п'ятий етап роботи). За оптимальним планом проводився 2-факторний експеримент, в якому варіювалися такі фактори:

X_1 – кількість добавки прискорювача твердіння Sika Rapid 3, від 0 до 2,4 % від маси цементу (від 0 до 9,6 кг/м³);

X_2 – кількість сталеві анкерної фібри діаметром 1 мм і довжиною 50 мм, від 0 до 100 кг/м³.

До складу всіх бетонів вводився суперпластифікатор MasterGlenium SKY 608 у кількості 1,2 % від маси цементу.

Встановлено, що кількість прискорювача твердіння несуттєво впливає на В/Ц сумішей рівної рухомості S2, а введення фібри вимагає підвищення В/Ц для збереження необхідної рухомості. За рахунок використання раціональної кількості суперпластифікатора, В/Ц всіх досліджених сумішей знаходилося в межах від 0,309 до 0,343.

Введення прискорювача суттєво підвищує ранню міцність бетонів на стиск і на розтяг при згині. У віці 2-х діб за рахунок використання добавки Sika Rapid 3 у кількості 1,8-2,4% міцність на стиск бетонів зростає на 9 МПа і більше, міцність на розтяг при згині на 0,6..0,7 МПа. У 28-ми денному віці бетони і фібробетони з прискорювачем твердіння характеризуються дещо меншою міцністю у порівнянні з аналогічними складами без добавки Sika Rapid 3.

За рахунок використання сталеві анкерної фібри рання міцність бетонів на стиск зростає на 3..5 МПа, проектна міцність на стиск – на 7..10 МПа. Найбільш суттєво дисперсне армування підвищує міцність бетонів на розтяг

при згині – з 5,6..6,1 МПа до 8,5..9,3 МПа у віці 2-х діб і з 7..8,5 МПа до 15,5..17,5 МПа у віці 28-ми діб. Фібробетони з кількістю прискорювача твердіння від 1,4% і фібри від 50 кг/м³ у віці 2-х діб мають міцність на стиск не менш 55 МПа. При використанні максимальної кількості дисперсної арматури та добавки Sika Rapid 3 рання міцність фібробетонів становить не менше 60 МПа, що дозволяє починати експлуатацію практично для всіх типів покриттів автодоріг і аеродромів.

Використання сталеві фібри підвищує морозостійкість бетону та на 30..35% знижує його стиранисть. Дисперсно-армовані бетони незалежно від кількості прискорювача твердіння мають морозостійкість F200 що є достатнім рівнем згідно ДСТУ 8858:2019. При введенні прискорювача твердіння за умови відсутності дисперсного армування морозостійкість матеріалу знижується в середньому на 50 циклів а стиранисть підвищується на 0,04 г/см². Незалежно від кількості прискорювача твердіння модифіковані суперпластифікатором MasterGlenium SKY 608 фібробетони з кількістю сталеві фібри від 40 кг/м³ характеризуються високою морозостійкістю і зносостійкістю ($G < 0,25$ г/см²), що забезпечує достатню довговічність матеріалу для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

За рахунок використання раціональної кількості сталеві фібри і прискорювача твердіння усадка бетонів знижується на 18..20%. Після 7 діб твердіння у повітряно-сухих умовах усадка фібробетону з прискорювачем становить $1,29 \times 10^{-4}$, а бетону без фібри і прискорювача – $1,60 \times 10^{-4}$. Гранична усадка бетонів складає не більше $\varepsilon \approx 2,5 \times 10^{-4}$ (0,25 мм/м). Також дисперсне армування підвищує адгезію бетонів до основи при їх використанні як ремонтних. При введенні 50 кг/м³ фібри адгезійна міцність підвищується на 7..9%, при використанні 100 кг/м³ – на 11..15%. При використанні прискорювача твердіння адгезійна міцність бетонів і фібробетонів знижується на 5..10%, що пояснюється зниженням міцності матеріалу у проектному віці. Максимальна визначена методом відриву адгезійна міцність фібробетонів без

використання ґрунтовки складає 2,8 МПа, при обробці поверхні контакту ґрунтовкою ІЗОГРУНТ – 3 МПа.

Показано, що розроблені модифіковані фібробетони відповідають усім основним вимогам до матеріалів для влаштування і ремонту жорстких дорожніх та аеродромних покриттів. Застосування таких фібробетонів дозволяє швидко відкривати або відновлювати рух та забезпечує якісну спільну роботу ремонтного матеріалу з основою.

П'ятий розділ присвячено впровадженню результатів досліджень.

Використання комплексу отриманих ЕС-моделей і з врахуванням собівартості та адгезії до старого бетону обрано оптимальні склади фібробетонів для глибинного ремонту та влаштування дорожніх і аеродромних покриттів. Обрані склади забезпечують високу ранню міцність та необхідну довговічність в типових умовах експлуатації. Відзначено, що оптимальний склад фібробетонної суміші і фібробетону на її основі для ремонту покриття може бути визначено лише після комплексного обстеження ремонтної ділянки. На основі отриманих даних і місцевих будівельних норм, склади ремонтних сталеві фібробетонів будуть коректуватись в залежності від вимог проекту на ремонтно-відновлювальні роботи. Для влаштування жорстких покриттів без висування вимог щодо більш швидкого введення в експлуатацію рекомендовано склади фібробетонів без прискорювача твердіння.

За результатами досліджень розроблено «Регламент з технології приготування і застосування швидкотвердіючого сталеві фібробетону для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг і аеродромів», який затверджений у ТОВ «БАУТЕХ-Україна». Також результати досліджень використовуються в освітньому процесі Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів за освітньою програмою «Автомобільні дорogi та аеродроми».

Ключові слова: дорожнє покриття, аеродромне покриття, ремонт, відновлення, влаштування, суперпластифікатор, прискорювач твердіння, сталева фібра, рання міцність, адгезія, стиранисть.

ABSTRACT

Kryzhanovskiy V.O. Modified concretes and fiber concretes for rigid highway and airfield pavements construction and repair.

PhD thesis. Specialty 192 – Construction and civil engineering – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odessa, 2022.

In the *introduction*, the choice and relevance of the research subject are substantiated. Connection of work with scientific programs, plans and themes is shown. The purpose of the work and research objectives are formulated, research methods are described, the provisions of scientific novelty and practical significance of the obtained results are given.

In the *first section*, the experience of using concrete and fiber-reinforced concrete for the highway and airfield pavements construction and repair was analyzed. It is shown that rigid pavements are actively used in the USA, Europe, China and other countries. In Ukraine until 2040 it is planned to increase part of the rigid road pavements up to 30%. The advantages of concrete pavements are their resistance to rutting, high flexural strength and frost resistance with low abrasion resistance.

The main defects and damages of rigid highway and airfield pavements and their causes are described. It is shown that high-early strength concretes and fiber-reinforced concretes, in particular with steel fibers, are used as a repair material for rigid pavements. The features of the mixtures and properties of concretes and fiber-reinforced concretes for the rigid highway and airfield pavements repair are analyzed. The experience of using modifiers and dispersed reinforcement in high-early strength concrete for highway pavements is described.

The *working hypothesis* of the research is formulated. The most effective methods for achieving high early strength along with high abrasion resistance, crack resistance and frost resistance of concrete for the rigid pavements repair and construction is the use of modern superplasticizers, hardening accelerators and fiber reinforcement. Also, due to the rational design of the concrete mixtures with a

combination of modifiers and fiber reinforcement, it is possible to reduce the shrinkage of the material, which will positively affect its adhesion. The concrete durability for the highway and airfield pavements construction must be ensured taking into account the operating conditions. For repair materials, durability must meet certain reasonable criteria. According to the regulatory documents of most countries, it is sufficient that the repair material has a service life of 4-5 years. At the same time, the indicators of early compressive and flexural strength are regulated by each contractor and customer separately, but they must acquire values that will not be less than the design requirements for the existing «old» road surface.

Based on the working hypothesis and based on the analysis of the technical literature, the *work objective* was formulated: the development of high-strength fast-setting concretes for the highway and airfield rigid pavements repair and construction with guaranteed durability through the application of steel anchor fiber, superplasticizer and hardening accelerator.

The *second section* presents characteristics of the research materials, the methodology and scheme for conducting research. At the first stage, a comparison of the concrete properties on different cement types was carried out. At the second stage of the work, exploratory studies of the physical and mechanical characteristics of fiber-reinforced concrete with polypropylene fiber were carried out. At the third stage, based on the optimal concrete mixtures using cements CEM II/A-S 42,5 and CEM IV/A(P) 42,5 R-SR, the effect of the superplasticizer MasterGlenium SKY 608 amount on the structure, physical and mechanical concrete properties was studied. At the fourth stage, the influence of metakaolin on the strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of concrete was studied. The fifth stage is devoted to the study of the fiber-reinforced concrete properties for the rigid highway and airfield pavements repair and construction. The sixth stage is the application into production of repair steel fiber reinforced concrete compositions with high early strength.

The *third section* contains the results of the first four stages of work and is devoted to the development of concrete compositions and study of the high performance concrete properties for rigid pavements repair and construction.

As a result of comparing the concrete properties on different cement types (CEM I 32.5 R/SR, CEM II/A-P 42.5, CEM IV/A(P) 42.5 R-SR, CEM II/A-S 42.5), concretes based on CEM II/A-P 42.5 and CEM II/A-S 42.5 provide better early strength, which is important for highway and airfield pavements. Taking into account the situation on the Ukrainian market, CEM II/A-S 42.5 was chosen as the main binder.

The conducted studies of fiber-reinforced concrete properties with polypropylene fiber showed the limited effectiveness of this fiber in concrete for the rigid pavements construction and repair.

The influence of the polycarboxylate type superplasticizer MasterGlenium SKY 608 on the strength and structure of concretes based on cements CEM II/A-S 42.5 and CEM IV/A(P) 42.5 R-SR was studied. It has been established that for concretes on both cement types, the amount of admixture 1,2% by weight of the binder is rational. Concrete with grade strength of 85,6 MPa and strength at the age of 3 days 64,1 MPa was obtained based on Portland cement CEM II/A-S 42.5. Concrete with a strength of 64,1 MPa and a strength of 37,0 MPa at the age of 3 days was obtained on the basis of CEM IV/A(P) 42.5 R-SR cement. X-ray phase analysis confirmed the positive effect of the polycarboxylate admixture in the structure formation of concrete.

The effect of the active mineral admixture metakaolin on the concrete properties modified with the MasterGlenium SKY 608 admixture for the highway and airfield pavements construction and repair was studied. It has been established that the cement replacement up to 30 kg/m³ with metakaolin does not improve the physical and mechanical concrete properties: frost resistance and abrasion resistance of concrete does not change, strength decreases. The shrinkage of concretes with metakaolin increases due to the increase in the W/C of mixture. It is shown that, taking into account the cost of metakaolin in the Ukrainian market today, it is impossible to recognize the rational use of this additional component in concrete for rigid highway and airfield pavements. But with the tightening of environmental requirements for the carbon footprint in our country, as well as in the event of a

significant increase in the cost of energy consumed for the clinker production, the use of pozzolanic active mineral admixtures in concrete pavements will be more appropriate.

The *fourth section* is devoted to the study of the fiber-reinforced concrete properties for full-depth repair and construction of rigid highway and airfield pavements (fifth stage of work). According to the optimal plan, a 2-factor experiment was carried out, with the following varied factors:

X_1 – amount of hardening accelerator admixture Sika Rapid 3, from 0 to 2,4% by cement content (from 0 to 9,6 kg/m³);

X_2 – amount of steel anchor fiber with a diameter of 1 mm and a length of 50 mm, from 0 to 100 kg/m³.

Superplasticizer MasterGlenium SKY 608 was introduced into the composition of all concretes in the amount of 1,2% of the cement content.

It has been established that the amount of hardening accelerator does not significantly affect the W/C of equal workability mixtures (S2), and the application of fiber requires an increase in W/C to maintain the required workability. Due to the use of a rational superplasticizer amount, the W/C of all studied mixtures was in the range from 0,309 to 0,343.

The use of the hardening accelerator significantly increases early compressive and flexural concrete strength. At the age of 2 days, due to the use of Sika Rapid 3 admixture in the amount of 1,8-2,4%, concrete compressive strength increases by 9 MPa or more, flexural strength by 0,6..0,7 MPa. At age of 28 days, concrete and fiber-reinforced concrete with the hardening accelerator are characterized by a slightly lower strength compared to similar compositions without the addition of Sika Rapid 3.

Due to the use of steel anchor fiber, the early concrete compressive strength increases by 3..5 MPa, the design compressive strength – by 7..10 MPa. Most significantly, fiber reinforcement increases concrete flexural strength – from 5,6..6,1 MPa to 8,5..9,3 MPa at the age of 2 days and from 7..8,5 MPa to 15,5..17,5 MPa at the age of 28 days. Fiber-reinforced concrete with the amount of hardening

accelerator from 1,4% and fibers from 50 kg/m³ at the age of 2 days have a compressive strength of at least 55 MPa. Using the maximum amount of fiber reinforcement and Sika Rapid 3 admixture, the early strength of fiber-reinforced concrete is at least 60 MPa, which makes it possible to start operation for almost all types of highway and airfield pavements.

The use of steel fiber increases the frost resistance of concrete and reduces its abrasion by 30..35%. Fiber-reinforced concrete, regardless of the hardening accelerator amount, has frost resistance F200, which is a sufficient level according to DSTU 8858:2019. Using the hardening accelerator in the absence of fiber reinforcement, the frost resistance of the material decreases by an average of 50 cycles, and the abrasion increases by 0,04 g/cm². Regardless of the hardening accelerator amount, fibrous concretes modified with MasterGlenium SKY 608 superplasticizer with a quantity of steel fibers from 40 kg/m³ are characterized by high frost resistance and wear resistance ($G < 0,25 \text{ g/cm}^2$), providing sufficient durability of the material for rigid highway and airfield pavements construction and repair.

Due to the use of a rational amount of steel fiber and a hardening accelerator, concrete shrinkage is reduced by 18..20%. After 7 days of hardening in air-dry conditions, the shrinkage of fiber-reinforced concrete with an accelerator is $1,29 \times 10^{-4}$, and concrete without fibers and an accelerator is $1,60 \times 10^{-4}$. Maximum shrinkage of concrete is not more than $\varepsilon \approx 2,5 \times 10^{-4}$ (0,25 mm/m). Also, fiber reinforcement increases the concrete adhesion to the base when it used as a repair material. When using 50 kg/m³ of fiber, the adhesive strength increases by 7..9%, when using 100 kg/m³ – by 11..15%. Using of the hardening accelerator reduces the concrete and fiber-reinforced concrete adhesive strength by 5..10%, which is explained by a decrease in the strength of the material at the design age. The maximum adhesive strength of fiber-reinforced concrete determined by the pull-off method without the application of a primer is 2,8 MPa, when the contact surface is treated with an ISOGRUNT primer – 3 MPa.

It is shown that the developed modified fiber-reinforced concretes meet all the basic requirements for materials for the rigid highway and airfield pavement construction and repair. The use of such fiber-reinforced concrete allows to quickly open or restore traffic movement and ensures high-quality joint operation of the repair material with the base.

The *fifth section* is devoted to the implementation of research results.

Using a set of obtained ES-models and taking into account the cost and adhesion to old concrete, the optimal compositions of fiber-reinforced concrete for rigid highway and airfield pavements full depth repair and construction were selected. Selected mixtures provide high early strength and required durability in service life. It is noted that the optimal fiber-reinforced concrete mixture and fiber-reinforced concrete based on it for the pavement repair can be determined only after a comprehensive inspection of the repair site. Based on the obtained data and local building codes, the compositions of the repair steel fiber concrete will be adjusted depending on the requirements of the project for repair and restoration work. For the rigid pavements construction without special requirements for quick commissioning, fiber-reinforced concrete compositions without a hardening accelerator are recommended.

Based on the research results, the «Regulations on the technology of preparation and use of fast-hardening steel fiber reinforced concrete for rigid highway and airfield pavements full-depth repair» was developed, approved by LTD «BAUTECH-Ukraine». Also, the research results are used in the educational process of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture in the preparation of master student in the educational program «Highways and airfields».

Key words: highway pavement, airfield pavement, repair, rehabilitation, construction, superplasticizer, hardening accelerator, steel fiber, early strength, adhesion, abrasion resistance.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. 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>
2. Kroviakov S.O., Kryzhanovskyi V.O. Influence of fiber reinforcement on concrete shrinkage for rigid road and airfield pavement repair. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2021, №84. С.78-86. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2021-84-78-86>
3. Kryzhanovskiy V.O., Kroviakov S.O. Zavoloka M.V. Influence of metakaolin on properties of concrete modified with polycarboxylate admixture for rigid pavement repair. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2021, №82. С.90-97. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2021-82-90-97>
4. Kryzhanovskiy V.O., Kroviakov S.O. Strength of rigid pavement concretes modified with polycarboxylate admixture on different types of cement. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020, №79. С.92-98. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-92-98>

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

5. Zheljko K., 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. 1174. <https://doi.org/10.3390/app12031174> (індексується Scopus, Web of Science)

6. 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. pp. 1-10. <https://doi.org/10.13167/2021.23.1> (індексується Web of Science)

7. Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Zavaloka M. Steel fibrous concrete with high-early strength for rigid pavements repair. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021, 1162. No. 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012008>

8. Kryzhanovskyi V., Kroviakov S., Zavaloka 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>

9. Kroviakov S., Zavaloka M., Dudnik L., Kryzhanovskyi V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the faculty of civil engineering Osijek - e-GFOS*. 2019, Vol. 10, no.19. pp. 81-86. <https://doi.org/10.13167/2019.19.8> (індексується Web of Science)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Кровяков С.О., Крижановський В.О., Заволока М.В. Вплив металевої фібри і прискорювача твердіння на міцність фібробетонів для ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів. Матеріали міжнародного семінару «*Моделювання та оптимізація будівельних композитів*». Одеса: ОДАБА, 2021, С. 46-50.

11. Андрєєва О.А., Заволока М.В., Кровяков С.О., Клименко Є.В., Софіяник А.М., Крижановський В.О., Шевченко В.В. Обстеження стану бетонного покриття нової злітно-посадкової смуги, руліжних доріжок та перону міжнародного аеропорту «Одеса». Тези доповідей міжнародної науково-

практичної конференції *«Експлуатація та реконструкція будівель і споруд»*. Одеса: ОДАБА, 2021, С. 30-31.

12. Кровяков С.О., Крижановський В.О., Міцність сталефібробетонів для ремонту жорстких дорожніх покриттів у різному віці. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції *«Гідротехнічне і транспортне будівництво»*. Одеса: ОДАБА, 2021, С.36-38

13. Кровяков С.О., Крижановський В.О. Модифікований сталефібробетон як ефективний матеріал для ремонту жорстких дорожніх покриттів. Збірка тез доповідей 77-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2021. С.170

14. Кровяков С.О., Крижановський В.О. Модифіковані бетони для влаштування і ремонту жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції *«Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій»*. Одеса: ОДАБА, 2021, С.52-55.

15. Кровяков С.О., Крижановський В.О. Модифіковані полікарбосилатною добавкою бетони для ремонту жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез доповідей III всеукраїнської науково-практичної конференції *«Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси»*. Одеса: ОДАБА, 2020, С.152.

16. Кровяков С.О., Крижановський В.О. Міцність модифікованих бетонів жорстких дорожніх покриттів на різних типах цементу. Збірка тез доповідей 76-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2020. С. 234.

ЗМІСТ

Анотація	2
Вступ.....	19
Розділ 1 Сучасний стань питання та теоретичні передумови досліджень.....	24
1.1 Світова практика використання бетону і фібробетону для влаштування та ремонту дорожніх і аеродромних покриттів.....	24
1.2 Основні дефекти і пошкодження жорстких дорожніх та аеродромних покриттів, причини їх виникнення.....	31
1.3 Властивості та особливості складів бетонів і фібробетонів для ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів	40
1.4 Використання модифікаторів і дисперсного армування в швидкотвердіючих бетонах дорожніх покриттів	47
1.5 Теоретичні передумови досліджень і наукова гіпотеза	53
Висновку до розділу 1	55
Розділ 2 Характеристики вихідних матеріалів та методи досліджень	57
2.1 Характеристики вихідних матеріалів.....	57
2.2 Методи досліджень	62
2.3 Схема проведення досліджень.....	65
Висновки за 2-м розділом.....	68
Розділ 3 Розробка складів і дослідження властивостей високофункціональних бетонів для ремонту та влаштування жорстких покриттів	69
3.1 Дослідження впливу різних типів цементу на властивості дорожніх бетонів	70
3.2 Дослідження властивостей модифікованих, дисперсно-армованих бетонів з поліпропіленовою фіброю	73
3.3 Дослідження впливу суперпластифікатора на В/Ц ремонтних бетонів на різних типах цементу	79
3.4 Вплив активної мінеральної добавки на властивості модифікованого бетону для влаштування і ремонту жорстких покриттів	87
Висновки за 3-м розділом.....	95

Розділ 4 Властивості фібробетонів для ремонту і влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.....	97
4.1 Вплив складу на В/Ц бетонних сумішей рівної рухомості.....	98
4.2 Вплив кількості прискорювача твердіння і фібри на міцність бетонів і фібробетонів в різному віці	102
4.3 Вплив сталевих фібри і прискорювача твердіння на морозостійкість та зносостійкість бетонів.....	114
4.4 Дослідження усадки бетонів і фібробетонів	119
4.5 Адгезія ремонтних фібробетонів до бетонної основи.....	125
Висновки за 4-м розділом.....	131
Розділ 5 Впровадження результатів досліджень.....	134
5.1 Вибір оптимальних складів фібробетону для ремонту і влаштування жорстких дорожніх та аеродромних	134
5.2 Технології приготування і застосування швидкотвердіючого сталевих фібробетону для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг і аеродромів.....	140
Висновки за 5-м розділом.....	145
Загальні висновки.....	146
Список використаних джерел.....	149
Додатки.....	177
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	178
Додаток Б. Акти впровадження результатів досліджень	182

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Жорсткі цементобетонні покриття автомобільних доріг і аеродромів широко використовуються в Європейському союзі, США, Китаї та інших розвинутих країнах. В останні роки в Україні також все частіше використовується цементобетон при будівництві та реконструкції автомобільних доріг і аеродромів. Крім того, в країні експлуатуються збудовані ще у ХХ сторіччі дороги та злітно-посадкові смуги з цементобетонними покриттями, переважно з залізобетонних плит, термін служби значної частини яких добігає кінця або повністю вичерпаний. Тобто існує перманентна необхідність ремонту жорстких покриттів, а обсяги подібних ремонтів з роками лише зростатиме. Водночас в більшості випадків при виконанні робіт важливим є максимально швидке відкриття трафіку. Ефективним видом ремонту, що забезпечує необхідну якість та довговічність покриття, є повномасштабний глибинний ремонт (full-depth repair), який передбачає заміну шару покриття від 1/3 до його повної товщини з використанням швидкотвердіючих бетонних сумішей.

При влаштуванні жорстких дорожніх покриттів на ділянках, що потребують швидкого відкриття руху, таких як перехрестя або підходи до мостів та шляхопроводів, також актуальним є використання швидкотвердіючих бетонних сумішей. Разом з тим слід враховувати щорічне збільшення транспортних навантажень, граничні значення яких часто перевищують проектні вимоги ще протягом періоду між капітальним ремонтом. В таких умовах ефективним матеріалом є фібробетон, який має високу міцність на розтяг при згині та стійкість до динамічних навантажень. Поява на ринку нових типів модифікаторів і дисперсної арматури дозволяє підвищити ефективність дорожніх бетонів, водночас необхідно враховувати особливості їх експлуатації та наявні вітчизняні в'язучі та заповнювачі. Відповідно задача розробки високоміцних швидкотвердіючих бетонів для ремонту і влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Одеській державній академії будівництва та архітектури на кафедрі автомобільних доріг та аеродромів в рамках держбюджетної теми «Розробка та впровадження сучасних технологій при будівництві автомобільних доріг, водопропускних споруд та аеродромів» (№ держреєстрації 0111U001249).

Метою роботи є розробка високоміцних швидкотердіючих бетонів для ремонту і влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів з забезпеченою довговічністю за рахунок використання сталеві анкерної фібри, суперпластифікатора і прискорювача твердіння.

Для досягнення мети поставлені **завдання**:

- визначити ефективність використання різних видів цементів в бетонах жорстких дорожніх покриттів;
- проаналізувати вплив суперпластифікатора полікарбосилатного типу на міцність і структуру бетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів;
- визначити доцільність заміни частини цементу метакаоліном в складі бетонів жорстких дорожніх покриттів;
- проаналізувати вплив прискорювача твердіння і сталеві анкерної фібри на технологічні властивості сумішей бетонів дорожніх покриттів;
- визначити вплив кількості прискорювача твердіння і сталеві анкерної фібри на ранню і проектну міцність бетонів жорстких дорожніх і аеродромних покриттів;
- проаналізувати вплив дисперсного армування та модифікаторів на властивості, що визначають довговічність дорожніх і аеродромних покриттів: морозостійкість та стиранисть;
- дослідити адгезійну міцність та усадку модифікованих бетонів і фібробетонів жорстких покриттів;
- визначити оптимальні склади фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів, які мають високу ранню міцність та необхідну довговічність в типових умовах експлуатації

- провести промислове впровадження результатів дослідження.

Об'єкт досліджень. Бетони і фібробетони для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів, модифіковані суперпластифікатором і прискорювачем твердіння.

Предмет досліджень. Закономірності впливу модифікаторів, дисперсного армування сталевую фіброю на структуру і властивості бетонів жорстких дорожніх та аеродромних покриттів.

Методи досліджень. Фізико-механічні характеристики модифікованих бетонів і фібробетонів визначалися відповідно до чинних нормативів на обладнанні атестованої лабораторії по вимогам ДСТУ ISO 10012:2005. Експериментальні дослідження властивостей армованих сталевую фіброю бетонів виконувалися за оптимальним 2-х факторним планом. Побудова і аналіз нелінійних експериментально-статистичних (ЕС) моделей проводилися із застосуванням спеціалізованої діалогової системи. Застосовувався рентгенофазовий аналіз структури бетонів і фібробетонів. Пошук оптимальних складів модифікованих фібробетонів проводився за комплексом отриманих ЕС-моделей.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- встановлено зміни фізико-механічних властивостей та структури бетонів жорстких дорожніх покриттів на різних типах цементів при застосуванні суперпластифікатора полікарбосилатного типу;

- встановлено вплив метакаоліну в якості частини в'язучого на властивості модифікованого бетону дорожніх покриттів;

- виявлено ефективність застосування дисперсного армування сталевую анкерною фіброю бетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів;

- за двома методиками експериментально підтвержено позитивний вплив дисперсного армування і прискорювача твердіння на адгезійну міцність дорожніх фібробетонів;

- набуло подальшого теоретичного розвитку і експериментально підтверджено можливість поліпшення фізико-механічних властивостей бетонів для жорстких дорожніх та аеродромних покриттів за рахунок використання дисперсного армування, суперпластифікатора полікарбосилатного типу і прискорювача твердіння;

- з використанням методів планування експерименту оптимізовано склади високоміцних швидкотердіючих сталевібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів з забезпеченою довговічністю в типових умовах експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів. Встановлена раціональна кількість суперпластифікатора полікарбосилатного типу для дорожніх бетонів на різних типах цементів. Розроблені склади модифікованих вібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів з високими рівнями міцності на стиск і на розтяг при згині в ранньому і проектному віці, морозостійкості, зносостійкості та адгезії до старого бетону. Розроблено і затверджено в компанії ТОВ «БАУТЄХ-Україна» «Регламент з технології приготування і застосування швидкотвердіючого сталевібробетону для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг і аеродромів». Результати досліджень використовуються в Одеській державній академії будівництва та архітектури в освітньому процесі 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 властивостей і структури модифікованих бетонів та вібробетонів для ремонту і влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів, обробці отриманих результатів, їх узагальнення, впровадження розроблених складів вібробетонів та технології їх використання у виробництво.

Основні результати досліджень були отримані здобувачем самостійно. Формулювання мети та завдань дисертаційної роботи, планування експериментальних досліджень на всіх етапах роботи, обговорення результатів

досліджень і вибір раціональних складів ремонтних фібробетонів були виконані спільно з науковим керівником. У надрукованих в співавторстві роботах особистий внесок здобувача полягає у проведенні лабораторних досліджень властивостей та структури бетонів і фібробетонів для ремонту і влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів, інтерпретації та узагальненні їх результатів.

Апробація дисертаційної роботи. Основні результати досліджень доповідалися на: III всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси» (м. Одеса, 2020 р.), 76-й і 77-й конференціях професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (м. Одеса, 2020, 2021 рр.), міжнародній науково-технічній конференції «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (м. Одеса, 2021 р.), міжнародній науковій конференції «Computational Civil Engineering SSE2021» (Румунія, м. Яси, 2021 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (м. Одеса, 2021 р.), IV міжнародній науково-практичній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (м. Одеса, 2021 р.), міжнародному науковому семінарі «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (м. Одеса, 2021 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані у 16 наукових працях, з яких 4 статті у фахових виданнях України, 5 статей у наукових періодичних виданнях інших держав (1 з них індексується наукометричними базами Scopus і Web of Science, 2 індексуються наукометричною базою Web of Science), 7 тез доповідей у збірниках наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертацію викладено на 185 сторінках, у тому числі 125 сторінок основної частини, складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (282 найменування) та 2 додатків на 6 сторінках, містить 49 рисунків і 19 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАНЬ ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Світова практика використання бетону і фібробетону для влаштування та ремонту дорожніх і аеродромних покриттів

За даними Укравтодору [1] станом на серпень 2020 року, частка доріг з жорстким покриттям становить 1% від всієї автотранспортної мережі України. Завдяки ухваленню програми розвитку цементобетонних доріг на період 2021-2025 рр. частка доріг з жорстким покриттям має досягти позначку у 3%, що в свою чергу становить 2900 км. До 2040 р. планується збільшення частки жорстких покриттів доріг до 30%. Переваги бетонних покриттів полягають у їх кращих фізико-механічних властивостях, зокрема високої міцності на розтяг при згині і морозостійкості при низькій стираності та стійкості до колесутворення. Значним плюсом технології цементобетонних доріг є мінімізація використання імпортованих будівельних матеріалів, перш за все бітуму, що особливо важливо при наявності вітчизняних виробників цементу. Сьогодні закінчується будівництво на наступних об'єктах: 80 км траси Н-31 від Дніпра до Києва, 75 км дороги Н-14 Кропивницький-Миколаїв, 22 км обходу Житомира М-06. Якісні дороги забезпечують економічність та безпеку перевезень протягом всього строку їх служби.

Успішним прикладом реалізації доріг з жорстким покриттям є досвід США та Європи, де частка бетонних дорожніх та аеродромних покриттів становить 40-60%. Для влаштування нових транспортних розв'язок використовуються високоефективні бетони з дисперсним армуванням (High-performance fiber-reinforced concrete), зокрема зі сталевією фіброю [2-5]. Застосування фібри дозволяє суттєво знизити товщину дорожньої плити [6, 7], підвищує такий важливий показник як міцність на розтяг при згині, та знижує усадочні деформації [8]. Дисперсно-армовані бетони мають кращі показники

довговічності та стійкості до динамічних навантажень, що особливо важливо для експлуатації дорожніх покриттів в типових для них умовах експлуатації.

Сталефібробетон було вперше використано у США в 1938 р. при будівництві автомобільної дороги, а через 30 років почалося їх масове будівництво. У 1968 р. загальна довжина сталефібробетонних покриттів на території США складала 8000 км, зокрема штати Мічиган, Айова, Міннесота. Аеродромне покриття площею 51400 м² було влаштоване зі сталефібробетону у аеропорту Лас-Вегаса, крім цього при влаштуванні злітно-посадкових смуг аеропортів Джона Кенеді, Тампа, Седар Репіндз, Каннон, Солт-Лейк-Сіті також використовувався сталефібробетон [9]. З 1960 років починається будівництво дисперсно-армованих покриттів у Німеччині, Швейцарії, Великій Британії та інших країнах [10, 11]. У Японії зі сталефібробетону побудоване національне шосе, особливою рисою якого є влаштування деформаційних швів через 30 м [6]. У Алтайському краї було проведено значний обсяг досліджень з ефективності сталефібробетонних дорожніх покриттів. Спостереження за таким типом покриття було проведено у період з 1982 р. по 1988 р. і показало, що навіть в сурих умовах експлуатації даного регіону не було виявлено жодних пошкоджень [12, 13].

Для ремонтного матеріалу дорожніх покриттів сталефібробетон вперше був використаний у США в 1972 р. Пізніше у штаті Іллінойс було виконано реконструкцію дороги Dan Ryan Expressway на магістралі I-90/94 з використанням сталефібробетону. Загальний бюджет проекту складав 1 млн. доларів [6]. На основі досвіду цього проекту також було проведено ремонт ділянок дорожніх покриттів у Чікаго та Іст-Сент-Луїс.

Департамент транспорту Нью-Джерсі з 1996 р. почав використовувати швидкотвердіючі бетони для ремонту жорстких покриттів. Після проведення додаткових досліджень з оптимізації швидкотвердіючих складів бетонів було розпочато використання технології fast track concrete для швидкого влаштування цементобетонного покриття у особливо навантажених ділянках

[14-16]. Міцність бетону на стиск через 6,5 годин становила 15 МПа, а міцність на розтяг при згині 2,4 МПа.

У [17-19] описано важливість розробки швидкотвердіючих дорожніх бетонів (fast track concrete) для відновлення перехресть з високими транспортними навантаженнями. Необхідна міцність на розтяг при згині для відновлення руху була 4,5 МПа, а міцність на стиск 15 МПа. Такі показники були досягнені через 8 годин твердіння бетону. По технології fast track concrete було влаштовано, відремонтовано та відновлено перенавантажені перехрестя Yelm Street, Clearwater Avenue і Kennewick Avenue на дорозі SR 365 у Вашингтоні.

Згідно проекту «EcoLanes», Греція, у 2006-2009 рр. для влаштування доріг використовували технологію укочуваного бетону, армованого переробленим сталевим шинним кордом [20]. Окрім високих показників міцності і тріщиностійкості такі фібробетони показали високу морозостійкість, а також не втратили показники проектної міцності при дії агресивних середовищ. Корозію сталеві фібри не було зафіксовано у жодному випадку. Після якісного влаштування ділянок жорстких покриттів на о. Кіпр технологія використовувалась у Британії, де було влаштовано жорстке покриття логістичного центру біля м. Лондон, у Румунії відновлено дорогу DN-17 від м. Кимпулунг-Молдовенеськ до м. Гура-Гуморулуй, а також у Туреччині поблизу м. Анталія було відновлено ділянку транзитної дороги довжиною 150 м і шириною 8,6 м [21].

Американські норми AC 150/5370-16 Rapid construction of rigid (Portland cement concrete) airfield pavements [22] визначають вимоги до застосування швидкотвердіючих бетонів для будівництва перонів, руліжних доріжок і злітно-посадкових смуг, а також до швидкого відновлення або реконструкції аеродромного одягу. Рання міцність бетону повинна досягати проектної міцності у терміни від 8 годин до 2 діб в залежності від проектних вимог.

У Японії для ремонту плити віадуку від втомних тріщин використовували сталеві фібробетон. Чисельні натурні та 3D випробування показали ефективність

саме цього композиту, у результаті чого він був обраний як основний для виправлення пошкоджень прольотної будови віадука [23].

В Южноуралському державному технічному університеті під керівництвом Б.Я. Трофімова було розроблено склад сталевібробетону для ремонту злітно-посадкової смуги Челябінського аеропорту, а також методику підбору ремонтних фівробетонних складів з заданими характеристиками [24].

Після 20 років експлуатації аеропорту Барі для ремонту перону використовувався сталевібробетон [25]. Ремонт був проведений у 2000 році, покриття експлуатується і сьогодні. На рис. 1.1 зображено фрагмент пошкодженої ділянки та фрагмент укладання сталевібробетону.

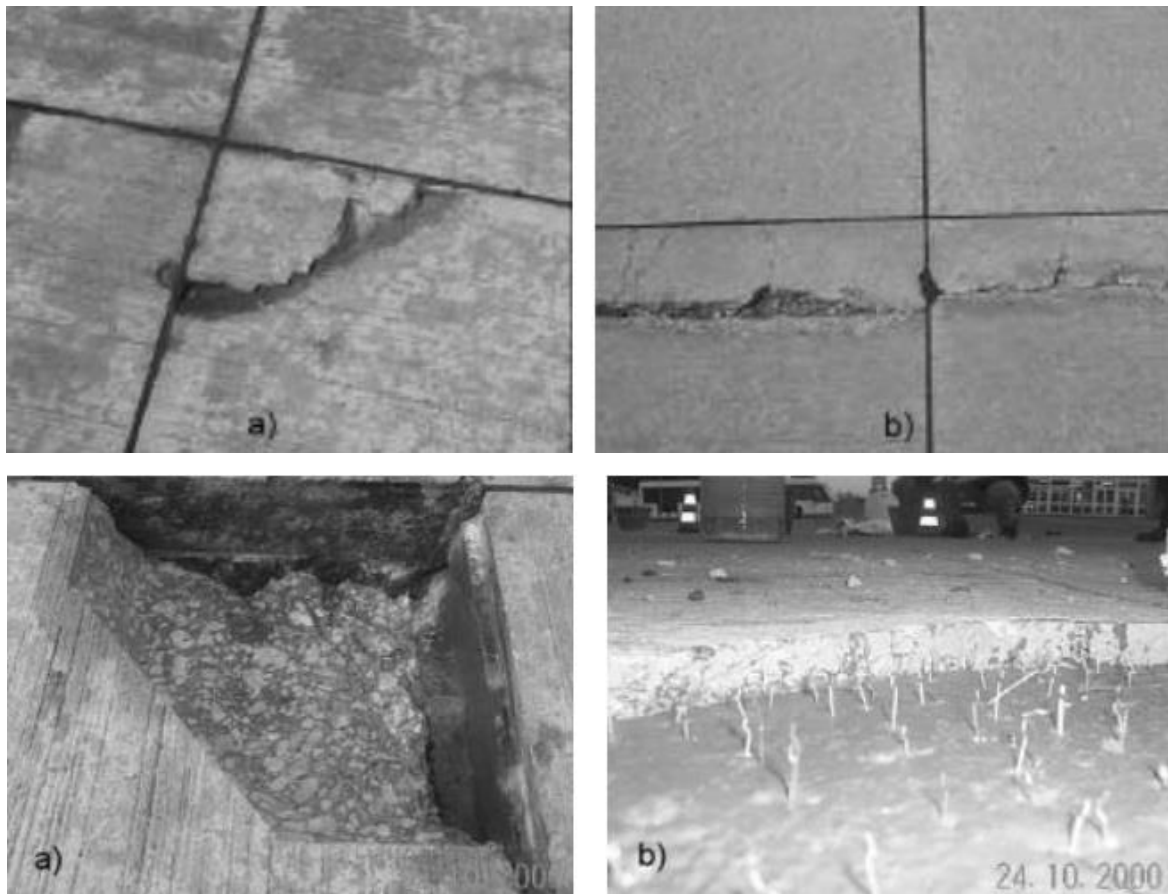


Рис. 1.1 Ремонт жорсткого покриття перону у аеропорті Барі, Італія

У Китаї також є досвід використання сталевібробетону для швидкого ремонту жорстких дорожніх покриттів [26]. Міцність на розтяг при згині на

першу добу твердіння матеріалу досягала значень від 3 до 4 МПа, на рис 1.2 зображено ділянку покриття, що ремонтується.



Рис. 1.2 Ремонт покриття з використанням технології full-depth repair

У [27] розроблено швидкотвердіючий сталевібробетон для відновлення та ремонту жорстких покриттів доріг та аеродромів. Після 1 доби твердіння міцність на розтяг при згині досягала 7,8 МПа, міцність на стиск 57 МПа. На рис. 1.3 зображено пошкоджений шар підсилення з асфальтобетону з подальшим його демонтажем та ремонтом жорсткого покриття по технології full-depth repair.

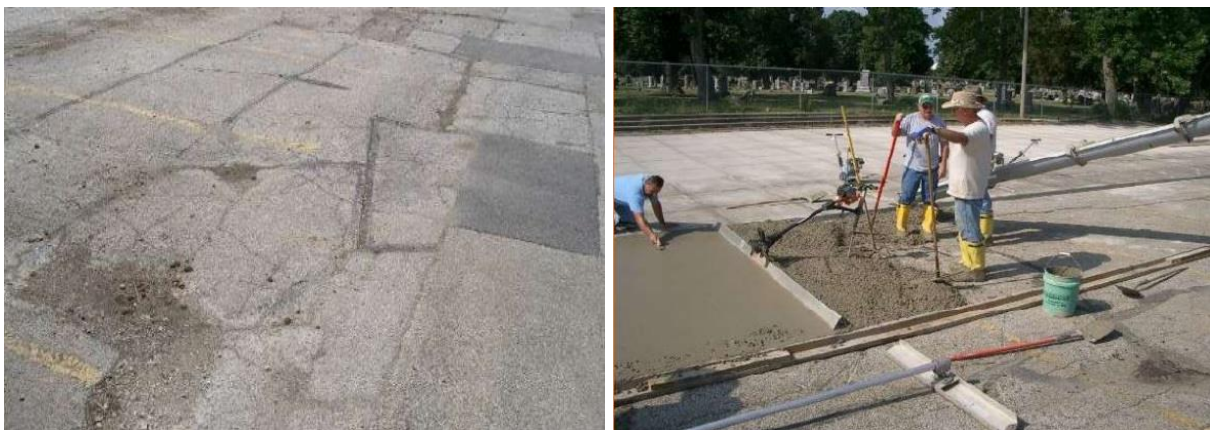


Рис. 1.3 Демонтаж шару підсилення і ремонт покриття швидкотвердіючим бетоном, штат Іллінойс, США

У штаті Вашингтон було відремонтовано ділянку шосе глибиною 12-15 см зі швидкотвердіючого бетону з дисперсним армуванням сталеву фібру, рис. 1.4.



Рис. 1.4 Ремонт покриття швидкотвердіючим бетоном з додаванням сталеві фібри, штат Вашингтон, США

Активно розвивається технологія ремонту та посилення як асфальтобетонних так і цементобетонних покриттів товщиною від 2,5 до 10 см (bonded concrete overlays) та товщиною 12-28 см (unbonded concrete overlays). Для виконання таких ремонтно-відновлювальних робіт також широко використовується сталеві фібробетон [28-31], а важливими показниками його якості є рання міцність та висока адгезія. В середньому довжина ремонтних ділянок складає 100-120 м. Його ефективність була підтверджена «Сертифікаційним листом з використання сталеві фібробетону у дорожньому будівництві (Louisiana Department of Transportation and Development)». На рис. 1.5 зображено ділянку, що влаштована зі сталеві фібробетону поверх старого асфальтового покриття, штат Айова, рис. 1.6 – влаштування шару підсилення в Уругваї.

У дисертаційній роботі [8] проведено натурні та модельні експерименти на основі яких доведено позитивний ефект сталевих волокон для запобігання раннього тріщиноутворення у самоущільнюючихся бетонах для відновлення жорстких покриттів доріг. Дослідження [32, 33] показали позитивний вплив

дисперсного армування сталевую фіброю на продовження терміну служби жорсткого покриття. Особлива увага приділяється втомному руйнуванню плити проїжджої частини, якому добре протистоїть дисперсно-армований сталевіфібробетон.



Рис. 1.5 Процес влаштування сталевіфібробетонного покриття, штат Айова



Рис. 1.6 Влаштування підсилюючого шару зі сталевіфібробетону, Уругвай

Таким чином, сталевіфібробетон є ефективним матеріалом для ремонту і влаштування жорстких дорожніх покриттів, який має високу міцність на розтяг

при згині та стійкість до тріщиноутворення та динамічних навантажень. Необхідно враховувати особливості експлуатації покриттів в умовах України та наявні вітчизняні в'язучі та заповнювачі. Відповідно задача розробки високоміцних швидкотердіючих фібробетонів зі сталевую фіброю для ремонту і влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів є актуальною.

1.2 Основні дефекти і пошкодження жорстких дорожніх та аеродромних покриттів, причини їх виникнення

Жорсткі дорожні та аеродромні покриття знаходяться під дією транспортних навантажень, які постійно збільшуються, одночасно на покриття діють різні природньо-кліматичні фактори. Їх сукупна дія сприяє зносу покриттів, виникненню значних пошкоджень і, як наслідок, погіршенню експлуатаційного стану, несучої здатності та подальшому руйнуванню. Необхідно відзначити, що строк служби багатьох існуючих транспортних розв'язок та аеродромних смуг підходить до кінця або давно вичерпаний. Можуть утворитися або вже утворені серйозні пошкодження покриттів, які впливають в першу чергу на безпеку руху та якість їзди. Без підвищення технічного рівня і експлуатаційного стану існуючих доріг ефективність роботи автомобільного транспорту залишається невисокою. Рівень розвитку дорожньої мережі істотно впливає на економічний і соціальний розвиток країни. Міцність дорожнього одягу є найважливішим транспортно-експлуатаційним показником, що впливає на технічний рівень і експлуатаційний стан автомобільної дороги. Здатність дорожніх конструкцій чинити опір багаторазовому впливу навантажень і забезпечувати ефективність логістичного процесу протягом міжремонтного строку служби є невід'ємною складовою якісного логістичного функціонування.

Для раціонального використання місцевих і сучасних будівельних матеріалів та вибору стратегії ремонту покриттів необхідно чітко розуміти, які дефекти виникають у дорожньому одязі жорсткого типу і до яких пошкоджень

вони можуть призвести. Також потрібно визначити можливі причини виникнення певних відказів конструкції покриття.

На сьогодні в Україні практично відсутні нормативні документи з класифікацією та визначенням причин виникнення пошкоджень жорстких дорожніх одягів. Тому нижче наведена їх типологія згідно джерел [34-36].

Пошкодження поверхні покриття. До цих дефектів відносяться тріщини, які виникають лише на поверхні дорожнього одягу при збереженні його несучої здатності. Можуть призвести до наступних видів пошкоджень:

Волосяні тріщини – виникають переважно від усадки бетону через незадовільний підбір складу бетонної суміші, можуть бути наслідком неналежного догляду за бетоном [37]. Як правило не поширюються більше ніж на 6 мм товщини плити.

Відшаровування – пошкодження поверхні, зазвичай на глибину від 1 до 30 мм (рис. 1.7*). Виникає через порушення технології догляду за свіжоукладеним бетоном, недотримання рецептури при виробництві робіт і як наслідок прояв недостатньої міцності і морозостійкості бетону, використання забруднених заповнювачів в результаті чого в верхній частині плити накопичуються забруднені домішки [38, 39]. Іншою причиною може бути багаторазове навантаження у поєднанні з різкими перепадами температури на поверхні покриття, особливо у осінній та зимній періоди.



Рис. 1.7 Відшаровування верхнього шару покриття

**Всі фото у п.1.2 зроблені автором*

Стирання – зменшення товщини покриття, оголення і поліровка крупного заповнювача через недостатню зносостійкість (рис. 1.8). Зчеплення з дорогою погіршується, утворюються поверхні ковзання, починається поверхневе руйнування покриття [40, 41].



Рис. 1.8 Стирання покриття з оголюванням крупного заповнювача

Вибоїни і раковини – місцеве руйнування покриття у вигляді поверхневих порожнин, зазвичай в діаметрі від 25 до 100 мм і глибиною від 13 до 50 мм (рис. 1.9). Утворюються через недоущільнення бетонної суміші, неякісну обробку поверхні покриття та використання заповнювачів із значним вмістом глини. Наслідком стає недостатня міцність поверхневого шару покриття [42].



Рис. 1.9 Вибоїни і раковини

Розтріскування. Тріщини зазвичай виникають у жорстких дорожніх одягах через недостатню міцність на розтяг при згині і є найпоширенішим видом руйнування. Поганий контакт покриття з основою, невірно нарізані температурні шви монолітного покриття або невірно виконані шви у збірному покритті, перевищення значень проектного навантаження і втрата несучої здатності викликає появу тріщин [43, 44].

Поздовжні, поперечні та діагональні тріщини – ділять дорожню плиту на дві або більше частин (рис. 1.10). З'являються при недостатньому контакті покриття з основою підстилаючого шару від поєднання повторних транспортних навантажень і напружень усадки [45]. Причинами можуть виступати порушення технології будівництва земляного полотна, наявність набухаючих ґрунтів основи, погане ущільнення бетону та незадовільне улаштування деформаційних швів.



Рис. 1.10 Діагональна тріщина

Відкол кутів плит – виникнення тріщини у плиті дорожнього одягу, яка перетинає сусідній поперечний та поздовжній стик приблизно під кутом 45° і поширюється на всю товщину плити (рис. 1.11). Втрата контакту покриття з основою утворює звисаючий край плити, а повторні навантаження збільшують згинаючий момент, виникають більші за розрахункові значення напружень [46].



Рис. 1.11 Відкол куту плити

Втомні тріщини – тісно розташовані тріщини, що виникають в районі стиків і деформаційних швів, або можуть бути паралельні будь-яким лінійним тріщинам (рис. 1.12). Розвиваються через недостатню морозостійкість бетону [47].



Рис. 1.12 Втомні тріщини

Руйнування заповнювача швів. Будь яка умова, що сприяє накопиченню сторонніх матеріалів у стику деформаційних швів або проникненню значної кількості води через шов з поверхні дорожнього одягу, викликає цей тип пошкодження (рис. 1.13) [48]. Поява сторонніх матеріалів може призвести до витіснення, адгезійного збою, розщепленню та повної

втрати герметику, внаслідок чого чужорідний матеріал накопичується у шві; природні фактори можуть спричинити проростання трави, коріння якої буде продовжувати руйнування шовного герметику. Просочування води через пошкодження ущільнення шва може частково або повністю розмити основу, що в свою чергу сприяє утворенню тріщин описаних вище. Причинами пошкодження герметику може бути використання неправильного його типу, невірна ширина з'єднання та неправильне нанесення герметику на незадовільно очищену поверхню стику перед ущільненням.



Рис. 1.13 Часткове руйнування заповнювача шва

Відкол кромки у стиках – відколювання краю плити в межах 0,3 м від стику внаслідок надмірних транспортних навантажень та інфільтрації нестисливих матеріалів, накопичених у шві (рис. 1.14). Тріщина зазвичай не проходить через всю товщину плити покриття, а перетинає її під кутом [49]. Відкол кромки може призвести до нерівностей стикових дюбелів, що викликає неправильний перерозподіл зусиль у шві і сприяє значним вертикальним і горизонтальним переміщенням кромки плит. Недостатня ширина швів може призвести до виникнення критичних стискаючих напружень при тепловому розширенні плити, що призводить до руйнування. Відсутність контакту з

основою може, в свою чергу, бути причиною погіршення необхідного розподілу транспортного навантаження.



Рис. 1.14 Відкол кромки у стику з одночасним руйнуванням герметику у шві

Змішані пошкодження. Є наслідками комплексної дії попередньо описаних порушень покриття, можуть виникати у різних перетинах дорожнього одягу.

Здимання або просадка покриття – локалізоване спотворення профілю дороги у стику або тріщині з подальшим руйнуванням бетону в цій області. Причинами є перезволоження ґрунтів земляного полотна, їх недостатня міцність та консолідація; наявність набухаючих та просідаючих ґрунтів; глибоке промерзання земляного полотна [50, 51].

Викривлення – зміна початкового положення плити у форму півмісяця, виникає через різницю температур верху та низу плити. Подовження та скорочення плити дорожнього одягу утворюється через неможливість вільного стиску та розтягу плити, яким чинять опір сили тертя і зчеплення, які, в свою чергу, прикладені з ексцентриситетом до центру ваги перетину плити та

визивають згинальні напруження. Причинами викривлення є високі температурні коливання при неякісному виконанні температурних швів [52].

Вертикальні переміщення плит – зміщення плит покриття в поздовжньому або поперечному напрямках без їх руйнування, в результаті чого утворюються перекося та уступи між суміжними плитами (рис. 1.15). Утворюються через недостатню міцність та консолідацію ґрунтів основи, наявність просідаючих та набухаючих ґрунтів, невдалу конструкцію швів розширення або їх відсутність, перевищення транспортних навантажень в порівнянні з проектними. Вертикальні переміщення знижують міцність дорожнього покриття через додаткові напруження [53].



Рис. 1.15 Вертикальне переміщення сусідніх плит

Проломи покриття – розтріскування покриття на окремі частини різного розміру з просадкою по вертикалі та повною зміною поперечного та поздовжнього профілів; повне руйнування дорожнього одягу (рис. 1.16). Конструкція дорожнього одягу не відповідає допустимим навантаженням, неприпустимі деформації земляного полотна, недостатня міцність бетону [54]. Причинами можуть бути ерозія земляного полотна та ґрунтів основи через накопичення та просочування вологи через тріщини покриття. Виникають порожнечі під дорожнім одягом, а отже втрачається контакт з основою.



Рис. 1.16 Пролом покриття

Аналіз можливих відказів дорожнього покриття показав, що причини для кожного окремого випадку невідповідності конструкції (дефекту) дуже схожі між собою. Умови роботи жорстких покриттів різні в залежності від місця прикладання навантажень як від транспортних засобів, так і від природних факторів. Найкритичніші умови експлуатації дорожніх конструкцій (дорожній одяг + земляне полотно) виникають у весняний період, істотно знижується міцність ґрунтів, прогин дорожнього одягу досягає критичних величин, що особливо небезпечно при повторних прикладаннях транспортних навантажень з малими інтервалами у часі.

Виникнення одного і того самого виду дефекту, але у різних перетинах, призведе до виникнення певного виду пошкодження зі своїми характерними рисами. При порушенні цілісності дорожнього одягу навантаження від коліс транспортного засобу передається на послаблену конструкцію, розподіляється на меншу площу, створюючи підвищені напруження і деформації. При несвоєчасному виконанні ремонтних робіт будуть з'являтися нові пошкодження, а велика кількість пошкоджень, залишених без уваги і своєчасного відновлення, призведе до повного руйнування дорожнього покриття.

1.3 Властивості та особливості складів бетонів і фібробетонів для ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів

Дорожні конструкції перестають виконувати задані функції та задовольняти за характеристиками вимогам руху транспорту в момент переходу в граничний стан. Для поліпшення стану доріг необхідно своєчасно проводити відповідний комплексний ремонт або реконструкцію.

Згідно «Проекту тематичного плану науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт державного агентства автомобільних доріг України з 2018 по 2021 рр.» [1] одним з пріоритетних напрямів досліджень є удосконалення та оновлення методів ремонту та влаштування жорстких дорожніх одягів із застосуванням сучасних місцевих будівельних матеріалів. Технології глибинного ремонту (full depth repair) [26-27,55], швидкого комплексного влаштування та ремонту (fast track concrete) [17-19], шарів підсилення (bonded and unbonded concrete overlays) [28-31] широко використовуються у світовій дорожньо-будівельній практиці для максимізації функцій обслуговування магістралей, мінімізуючи порушення роботи транспортної системи. Для якісного проведення вищеописаних робіт використовуються високоміцні швидкотвердіючі бетони і фібробетони. У таблиці 1.1 наведено типи та ступінь пошкоджень, що вимагають швидкісного глибинного ремонту.

Для незначних пошкоджень використовують більш прості методи ремонту, що потребують застосування бетонних сумішей з дрібним заповнювачем або готових сухих будівельних сумішей [56, 57].

Для бетонів і фібробетонів для ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів важливим показником якості є міцність, яку матеріал має набути для відкриття руху у найкоротший термін, а також технологічність суміші.

Загальні критерії пошкоджень жорстких покриттів для швидкісного глибинного ремонту (full-depth rapid repair) [55]

<i>Тип пошкодження</i>	<i>Мінімальна ступінь несправності, що потрібна для глибинного ремонту</i>
Пролом покриття	При появі перших окремих шматків плити
Кутовий відкол	Тріщина не простягається більше ніж на 15 мм, кутовий елемент не розділений на окремі шматки
Втомні тріщини	Тріщини чітко виражені, а деякі дрібні шматочки були зміщені
Погіршення стану поздовжніх та поперечних стиків	Відсутність заповнювача у шві від 10 до 50% об'єму. Відкол кромки шириною 75-150 мм
Поздовжні та поперечні тріщини	Ширина розкриття тріщини 3-13 мм та просадка покриття ≥ 6 мм або відкол покриття до 75 мм
Вибоїни	Глибиною ≥ 20 мм і діаметром від 50 мм
Просадка покриття	Зміщення початкового положення покриття по вертикалі ≥ 12 мм

Спираючись на огляд *Raymond Bassim & Mohsen Issa* [58], на середньому заході США переважно застосовують портландцемент Типу I і використовують наступні критерії для ремонтних складів: Іллінойс – витрата цементу 386-445 кг/м³, В/Ц в діапазоні 0,32-0,44, мінімальна міцність на стиск для відкриття трафіку $f_{cm} = 22$ МПа, на розтяг при згині $f_{ctf} = 4,1$ МПа; у штаті Індіана регламентована витрата цементу 390 кг/м³ при В/Ц рівному 0,45, мінімальна міцність на розтяг при згині для відкриття трафіку $f_{ctf} = 2,1$ МПа; нормативи штату Айова – витрата цементу 468-504 кг/м³, допустимі значення В/Ц ремонтних складів 0,328-0,4, мінімальні міцності для відновлення руху $f_{cm} = 20,1$ МПа, $f_{ctf} = 3,45$ МПа; штат Мічіган регулює витрату цементу на 1 м³ бетону

279-391 кг, вимоги до мінімальних міцностей на стиск і розтяг при згині $f_{cm} = 18$ МПа, $f_{ctf} = 3,8$ МПа; штат Огайо – витрата цементу становить 309-534 кг/м³, а мінімальна міцність на розтяг при згині для відновлення дорожнього руху $f_{ctf} = 2,8$ МПа. Згідно [59, 60] рекомендована ремонтна суміш виготовляється на основі портландцементу типу I в кількості 386 кг/м³ і модифікується суперпластифікатором та прискорювачем твердіння. Максимальний розмір крупного заповнювача 9,5 мм з витратою 603 кг/м³. Відношення дрібного заповнювача до крупного 50/50, В/Ц суміші 0,347. Згідно [61] мають використовуватися швидкотвердіючі ремонтні склади бетонів з міцністю на розтяг при згині 2,8 МПа через 4 години твердіння та міцністю на стиск 18 МПа через одну добу твердіння. Вимоги до в'язучих та заповнювачів регламентуються окремо в залежності від тяжкості пошкодження та мінімального часу для відкриття руху.

Згідно *Wisconsin Department of Transportation* [62] і *WHRP 0092-15-08* [63] та досліджень *Yadira A. Porras* [64] для отримання спеціального швидкотвердіючого бетону для дорожнього покриття використовували цемент типу I, який відповідає такому ж типу відповідно державному нормативу ДСТУ Б.В.2.7-46-2010 «Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови» [65], а також типу III, який відноситься до швидкотвердіючого портландцементу ASTM C150/150M-20 «Standard Specification for Portland Cement» [66] та який не виробляється в Україні. Типу III відповідають шлакопортландцементи згідно [65] з вмістом гранульованого доменного шлаку від 36 до 95%. Витрата цементу на 1 м³ бетону складала 390-502 кг, а для досягнення міцності на стиск 21 МПа через 8 годин використовували хлорид кальцію у сухому та рідкому видах й інші добавки-пластифікатори, нехлоридні прискорювачі та повітровтягуючі добавки. В якості крупного заповнювача використовували подрібнений вапняк, щебінь, кремністий та вулканічний гравій з максимальним розміром фракції 20 мм, з відношенням заповнювачів 50/50. В/Ц сумішей було від 0,3 до 0,45, рухливість від 5-10 см до 10-18 см. Міцність при стиску на 1 добу була від 33 до 46 МПа, проектна міцність 51-

70 МПа. Автор [67] пропонує застосовувати цемент типу III для ремонтних композицій з подальшим їх модифікуванням суперпластифікаторами та прискорювачами твердіння. У деяких випадках рекомендується додавання золи виносу та повітровтягуючих добавок. В/Ц відношення має бути у діапазоні 0,4-0,48. Витрата крупного заповнювача 778-1070 кг/м³, дрібного заповнювача 596-834 кг/м³. Витрата цементу становить 283-448 кг/м³. Мінімальна міцність на розтяг при згині для відкриття руху $f_{ctf} = 2,4-3,45$ МПа. *T. J. Van Dam* та інші [68-72] у своїх дослідженнях відзначили, що найбільш поширеними цементами для швидкотвердіючих бетонів є цементи типу I, III. Бетонні суміші модифікувалися переважно суперпластифікаторами, добавками повітровтягуючої дії та прискорювачами твердіння, зокрема CaCl₂. Відповідно до [47, 73] при ремонті пошкоджень глибиною більше 5 см максимальна крупність заповнювача повинна бути не більше 20 мм. Для прискорення твердіння бетону використовують цемент марки не нижче 500, а у воду замішування додають хлористий або азотнокислий кальцій до 2% від маси цементу. Рух автотранспорту в залежності від місцевих вимог може бути відкритий через 1-7 діб. Також у деяких випадках використовувався цемент типу II. Витрата цементу на 1 м³ бетонної суміші становила 322-534 кг з додаванням 10% летючої золи при В/Ц 0,35-0,425. В якості крупного заповнювача використовувався високоякісний подрібнений вапняк, високоякісне габро та щебінь. Співвідношення дрібного і крупного заповнювачів 45/55. Міцність на стиск через 1 добу була у діапазоні від 14 до 50 МПа, у проектному віці 36-67 МПа, міцність на розтяг при згині у віці 1 доби складала від 2,4 до 5 МПа.

Ivan Quezada рекомендував використовувати цементи типу II, III, V і глиноземистий цемент [74] з витратою на 1 м³ бетону 469-505 кг та В/Ц сумішей в межах 0,33-0,35. В якості модифікаторів використовували прискорювач твердіння нехлоридного типу, суперпластифікатор, повітровтягуючу добавку і стабілізатор гідратації. Кількість крупного (подрібнений вапняк) і дрібного заповнювача (кварцовий пісок) складала 771-

1060 кг/м³ і 602-771 кг/м³ відповідно, максимальна крупність 19 мм. *Nevada Department of Transportation* [75] використовують цементу типу III і V – сульфатостійкий цемент, а також сульфоалюмінатний цемент. Максимальний розмір крупного заповнювача 20 мм, співвідношення між крупним та дрібним заповнювачем 55/45. Витрата цементу типу V складала 385-564 кг/м³, а витрата цементу типу III – 326-445 кг/м³. Рухливість сумішей була 9-19 см. В/Ц варіювалося в залежності від складу бетону і типу цементу та складало 0,275-0,4. Міцність на стиск отриманих бетонів на цементі типу V через 1 добу складала 37-69 МПа, а проектна міцність 52-104 МПа. В свою чергу міцність на розтяг при згині через 1 добу досягла значень 7,7-8 МПа, а у віці 28 діб 10,4-11,2 МПа. Міцність на стиск отриманих бетонів на цементі типу III через 1 добу складала 40-60 МПа, а проектна міцність 52-84 МПа, міцність на розтяг при згині у віці 1 доби становила 6,1-7,2 МПа, а у віці 28 діб 8,9-10,0 МПа.

А.В. Ключев і А.В. Дураченко запропонували використовувати фібробетони на основі скляної фібри для ремонту дорожніх покриттів [76]. Основним в'язучим був цемент типу I, ремонтна суміш модифікувалася суперпластифікатором. Заповнювачем виступав молотий граніт максимальним розміром 5 мм, модуль крупності $M_{кр} = 2,12$. Інші науковці також виступали за використання фібробетонних сумішей [61, 62]. Рекомендації *Dale Harrington, Gary Fick, Peter Taylor* [77] регламентують витрату цементу в діапазоні 270-335 кг/м³ з додаванням до 25% золи виносу від маси цементу при В/Ц 0,40-0,42. Також пропонується використовувати фібри з різноманітних матеріалів – скло, сталь, базальт, поліпропілен і т.п. для підвищення тріщиностійкості та ударної в'язкості. Міцність на розтяг при згині на 7 добу повинна бути не менше 3,8 МПа. У рекомендаціях [78] і роботі [79] посилення методами зрощування або нарощування шарів із застосуванням бетонних, фібробетонних та модифікованих сумішей вказується як необхідний захід при капітальному ремонті цементобетонних покриттів. Ремонтні суміші мають бути з високою ранньою міцністю $f_{ctf} = 5,0$ МПа через 1 добу твердіння і $f_{ctf} = 8-9$ МПа у марочному віці, $f_{cm} = 52$ МПа через 1 добу, $f_{cm} = 80-100$ МПа у віці 28 діб, та

мати морозостійкість не менше F300. В/Ц сумішей не повинно перевищувати 0,4. Для підвищення тріщиностійкості, зносостійкості і міцності на розтяг при згині рекомендується застосовувати сталеву, базальтову та інші види фібри з витратою 50-350 кг/м³ в залежності від необхідних властивостей бетону та питомої ваги фібри. Марка по легкоукладальності суміші може бути в межах П1-П4 в залежності від обсягу робіт та типу механізованої техніки. У експерименті використовувалася бетонна суміш з витратою цементу Типу І 385-436 кг/м³ та додаванням 25% гранульованого доменного шлаку від маси цементу, В/Ц 0,36-0,44. Подрібнений вапняк з максимальним розміром 19 мм використовувався у якості крупного заповнювача, дрібним заповнювачем виступав природний пісок. Бетонна суміш з рухливістю 5-15 см модифікувалася пластифікатором, повітровтягуючою добавкою та макросинтетичною фіброю у кількості 2,4-3,7 кг/м³. У [80] рекомендований ремонтний склад для зниження усадки приготувався на рядовому портландцементі і модифікувався введенням різних розмірів нейлонової фібри у кількості 3-6 кг/м³. Дрібний заповнювач складався з річного піску $M_{кр} = 2,86$ та подрібненого піску з модулем крупності $M_{кр} = 2,62$. Максимальний розмір крупного заповнювача 32 мм. Запропоновано застосовувати фібробетонні суміші у якості ремонтних з використанням сталевих фібри [81, 82] від 25 до 50 кг/м³. Крупним заповнювачем виступав щебінь з максимальним розміром 12,5 мм, річний пісок використовувався у якості дрібного заповнювача. Найбільш ефективно застосування таких ремонтних складів бетонів на підходах і обходах великих міст та на дорогах з жорстким покриттям вищих категорій. При цьому товщина посилення дорожнього покриття має бути визначена через розрахунок на міцність при згині та приведена до товщини матеріалу з найбільшим модулем пружності. При реконструкції бетонної площадки у аеропорту Барі (Італія) *Pasquale Colonna* і *Vittorio Ranieri* [25] рекомендували ремонтний склад із сталеві фібробетону з вмістом фібри 50 кг/м³ та максимальним розміром крупного заповнювача з вапняку 15 мм з частковим застосуванням заповнювача у вигляді утилізованого бетону від старого покриття. У [83]

використовувався цемент типу III з витратою 490 кг/м³, В/Ц 0,39-0,41. У ремонтному складі використовувалася синтетична фібра. Міцність бетону через 1 добу твердіння повинна бути не менше 21 МПа, рухливість суміші 3,8-10 см. Запропонована у [84] технологія передбачає застосування ультра-високофункціональних ремонтних складів із поліетиленовою фіброю у кількості 19 кг/м³. Міцність на стиск через 1 добу твердіння складала 69-83 МПа. У [2] застосовувалося дисперсне армування бетону сталеву (78 кг/м³), скляною (26 кг/м³) та поліпропіленовою фіброю (9 кг/м³). Витрата цементу на 1 м³ складала 330-475 кг. Дрібним заповнювачем виступав кварцевий пісок у кількості 637-783 кг/м³, крупним – подрібнений вапняк у кількості 1063 кг/м³. Міцність бетону на стиск у проектному віці досягала 53 МПа, на розтяг при згині 7,1 МПа. У [85] дослідники також застосовували поліпропіленову та сталеву фібру у комплексі з повітровтягуючою добавкою і пластифікатором. В'язучим був цемент типу I у кількості 380 кг/м³ бетону. Міцність на стиск отриманих бетонів у віці 7 діб складала від 31 до 33 МПа, на розтяг при згині від 4,85 до 5,55 МПа. У віці 28 діб показники міцності на стиск досягали 54-62 МПа, на розтяг при згині 9,4-10,3 МПа.

Нормативна база України практично не виділяє ремонтні бетони, але, беручи до уваги вищеописаний досвід приготування і використання матеріалів для отримання швидкотвердіючих ремонтних бетонів для жорстких дорожніх покриттів (full-depth repair), можна зробити висновок, що доступні на ринку України місцеві будівельні матеріали дозволяють отримати бетони з аналогічними фізико-механічними характеристиками. При цьому задача отримання саме швидкотвердіючих бетонів для жорстких дорожніх покриттів є актуальною для вітчизняного матеріалознавства.

Проаналізувавши вищеописані джерела необхідно підкреслити основні вимоги по міцності ремонтних бетонів для жорстких дорожніх покриттів для відкриття трафіку. Мінімальна міцність на стиск для відкриття трафіку повинна знаходитися у межах 18-40 МПа, а мінімальна міцність на розтяг при згині у діапазоні 2-6 МПа [58, 61, 67, 68, 78, 84].

Основними в'язучими у проаналізованих роботах виступали: цемент типу I у кількості 279-534 кг/м³, В/Ц бетонних сумішей в діапазоні 0,32-0,44 [26, 58-60, 63, 70, 74, 76]; цемент типу III (швидкотвердіючий згідно [66]) з витратою 326-502 кг/м³ при В/Ц відношенні 0,3-0,45 [2, 67, 70-74, 76]; цемент типу V (сульфатостійкий згідно [66]) витрата якого становила 385-564 кг/м³, В/Ц бетонних сумішей 0,33-0,4 [2, 74, 75, 78, 79].

Високі показники міцності при збереженні легкоукладальності бетонних сумішей отримували за рахунок введення пластифікаторів на основі полікарбоксилатів. При необхідності підвищення ранньої міцності у бетонні суміші додатково вводили прискорювачі твердіння [59, 60, 67, 68, 70, 72].

Дорожнє покриття працює як плита на пружній основі, міцність на розтяг при згині відіграє важливу роль для збереження несучої здатності цементобетонного покриття. Для підвищення цього важливого показника використовували дисперсне армування з різними типами фібри: сталева [2, 25, 77, 82, 83, 87], поліпропіленова [81, 84, 85, 86], базальтова [80], скляна [77]. Також фіброві волокна сприяють підвищенню тріщиностійкості та зносостійкості бетону, що особливо важливо при динамічних впливах від транспортних навантажень.

Спираючись на дані проаналізованих джерел можна сказати, що для отримання швидкотвердіючих ремонтних бетонів необхідно використовувати сучасні модифікатори пластифікуючої дії, які здатні суттєво зменшувати В/Ц відношення бетонних сумішей при збереженні їх легкоукладальності. При цьому рухомість сумішей має відповідати марці П2, як найпоширенішій для ремонтних складів жорстких дорожніх покриттів [62, 67, 68, 76, 84].

1.4 Використання модифікаторів і дисперсного армування в швидкотвердіючих бетонах дорожніх покриттів

Світовий досвід показав [12, 26, 46, 50, 86-88] ефективність жорстких дорожніх покриттів і це сприяло широкому використанню цементобетону при

розвитку дорожньої мережі України [1]. В залежності від проектних умов, експлуатаційних навантажень та доступної техніки з'являється необхідність створення нових модифікованих бетонних композицій з заданими властивостями. У сучасній дорожньо-будівельній практиці успішно використовуються бетони та фібробетони [54, 89, 90] з високою ранньою міцністю на розтяг при згині, яка на 2 добу твердіння вже може досягати значення в межах 5-7 МПа. Саме міцність на розтяг при згині є основною характеристикою міцності для дорожніх покриттів, які працюють як плита на пружній основі.

Дисперсне армування. У [11, 14, 91] встановлено, що використання сталевих фібробетону у дорожньому будівництві суттєво підвищує міцність на стиск, розтяг при згині і морозостійкість [20, 92]. Також застосування дисперсного армування дозволяє знизити стиранисть бетону на 40-70 % в залежності від кількості і типу фібри [93, 94], а отже підвищити довговічність дорожнього покриття. Окрім цього, застосування фібри різних типів знижує такий негативний ефект як усадка [95-99]. Це дозволяє з повним потенціалом застосовувати швидкотвердіючі дорожні бетони з доволі низьким В/Ц (в межах 0,3), які потенційно мають проблеми з раннім розвитком тріщиноутворень через підвищення деформацій усадки, особливо у ранні строки твердіння [100].

Як відомо з джерел [101-105], високоміцні бетони мають підвищену крихкість, особливо під впливом динамічних навантажень. Отже використання дисперсного армування швидкотвердіючих високоміцних дорожніх бетонів, які постійно знаходяться під впливом динамічних навантажень від транспортних засобів, є досить ефективним вирішенням проблеми їх крихкості.

Зазвичай максимальна кількість фібри складає 1% від загального об'єму бетону [106]. Важливо раціонально використовувати дисперсне армування [107], особливо сталеву або скляною фіброю з довжиною більше 10 мм, тому що при передозуванні може проявлятися негативний ефект такого армування. Основним деформованим станом дорожнього покриття є розтяг при згині, при розташуванні фібри під кутом 90 градусів до основного перетину дорожньої

плити ефект армування буде мінімальним [108]. Фіброві волокна будуть виштовхуватись і прагнути розрізати перетин, тим самим будуть виникати додаткові напруження, які негативно впливатимуть на несучу здатність дорожньої плити. Також підвищений вміст фібрових волокон буде негативно впливати на показники рухливості бетонної суміші.

Ефективність використання дисперсного армування у бетоні полягає у двох основних принципах: високі фізико-механічні характеристики матеріалу фібри та міцність зчеплення фібрових волокон з бетонною матрицею. У швидкотвердіючих бетонах робота фібри буде кращою за рахунок досягнення високої ранньої міцності бетону і, як наслідок, підвищення адгезійної міцності системи «фібра-бетонна матриця» [109-111].

Основними передумовами отримання швидкотвердіючих бетонів є: зниження В/Ц із збереженням легкоукладальності за рахунок модифікування ефективними суперпластифікаторами, використання прискорювачів твердіння, підбір оптимальної гранулометрії заповнювачів, застосування високоміцних в'язучих, дисперсне армування з використанням різних типів фібри. Питанням отримання бетонів і фібробетонів з високою ранньою міцністю займалися: Дворкін Л.Й., [112-116], Саницький М.А., [117-127], Шейніч Л.О., [128-130], Шишкін О.О. [131-134], Барабаш І.В. [135, 136], Мішутін А.В. [137, 138], Дерев'янка В.М. [139-144], Капрієлов С.С. [145, 146], Толмачов С.М. [147], Пшінько О.М. [148-152] Sergio F. Brena, Scott F. Civjan [153], Jacek Golas [154], Rui Yu [102, 155, 156], Peipeng Li [103,104], Cao Y. [105, 108], Mari Bøhnsdalen Eide, Jorun-Marie Hisdal [157] та інші вчені.

Сучасні дослідження у напрямі отримання швидкотвердіючих бетонних сумішей для влаштування і ремонту дорожніх покриттів мають бути сконцентровані на застосуванні місцевих будівельних матеріалів в комплексі з хімічними добавками і дисперсним армуванням, що, в свою чергу, дозволяє отримати матеріал із оптимальними характеристиками сумісності з існуючим покриттям, а саме високою адгезією і низькою усадкою у ранні строки твердіння. Раннє тріщиноутворення компенсується введенням сталеві фібри, і

одночасно підвищує показник міцності на розтяг при згині, як основний для дорожнього покриття.

У світовій практиці [60-62, 65, 66, 68, 158] основним в'яжучим часто є високоміцні, швидкотвердіючі цементи, які можуть забезпечити ранню міцність (1-2 доба) > 25 МПа без використання додаткових добавок прискорювачів. Важливо відзначити, що на території України не виробляються швидкотвердіючі цементи, які повинні мати міцність у 2-х добовому віці не менше 55% від 28-ми добової міцності згідно [159], а за вимогами [63] для цементів марки 500 і 500 Р міцність на 2 добу повинна бути не менше 15 і 20 МПа відповідно. Спираючись на [160], цементи марки 42,5 R і 52,5 R повинні мати міцність на 2 добу 20 і 30 МПа відповідно, при цьому такі характеристики міцності мають бути досягнуті при В/Ц 0,5 згідно [161].

Відповідно з урахуванням вітчизняної сировинної бази постає задача з підбору оптимальних складів бетону на основі доступних на ринку рядових цементів, з подальшим їх модифікуванням для отримання високоміцних композицій у ранньому віці. Швидке наростання міцності портландцементу, обумовлене спеціальним мінералогічним складом (підвищений вміст C_3A) [162-166] та збільшенням питомої ваги, з якою одночасно збільшується поверхня гідратації, а отже прискорюється процес новоутворень [167-169]. Зменшення В/Ц до 0,3 и нижче забезпечує швидке наростання міцності бетонів, вже через 8-10 годин міцність може досягати 10-20 МПа [170]. Таким чином, правильним рішенням для отримання бетонів с високою ранньою міцністю є використання водоредукуючих і прискорюючих добавок, які дозволяють проектувати рівнорухливі бетонні суміші без дефіцитних високомарочних в'яжучих, а також дають змогу активно використовувати шлакові портландцементи [171].

Основними водоредукуючими добавками у наш час є *суперпластифікатори*, з їх появою ще у 60-ті роки кардинально змінилась технологія бетону. Суперпластифікатори дають можливість досягати необхідної рухливості бетонної суміші при меншій кількості води у порівнянні з класичними трикомпонентними сумішами [171-175]. За складом і механізмом

дії суперпластифікатори класифікуються: на основі полікарбоксилатів і поліакрилатів зі стеричним механізмом дії; на основі очищених від цукрів лігносульфонатів, на основі сульфованих меламін-формальдегідних конденсатів та на основі сульфованих нафталін-формальдегідних конденсатів – усі з електростатичним механізмом дії [170, 176-178].

Ефективність пластифікуючого ефекту обумовлюється розташуванням активних груп у молекулах, довжиною і формою їх ланцюгів та молекулярною масою. Молекули суперпластифікатора електростатично зв'язуються з зернами цементу і дають їм негативний заряд [179]. У сукупності електростатичні відштовхування розділяють зерна цементу, тим самим створюють більше контактних поверхонь для реакції з водою. Суперпластифікатори на основі полікарбоксилатів є більш ефективними за рахунок довшого молекулярного ланцюга та наявності бокових відгалужень, що інтенсивніше диспергують однойменно заряджені частки на більш великі відстані за рахунок просторового відштовхування, чим створюється ще більше поверхонь контакту з водою. Дисперговані частинки цементу залишаються на більшій відстані одна від одної, чому сприяє більш довший ланцюг молекули полікарбоксилату [180-182]. У дослідженні [183] описано, що водопотреба бетонної суміші визначається електричними зарядами і боковими ланцюгами, збережність бетонної суміші зв'язана зі швидкістю адсорбції полімерів на частинках цементу, розвиток ранньої міцності бетону – формою полімерної молекули в цілому. На рис. 1.17 схематично зображено стеричний ефект дії суперпластифікаторів.

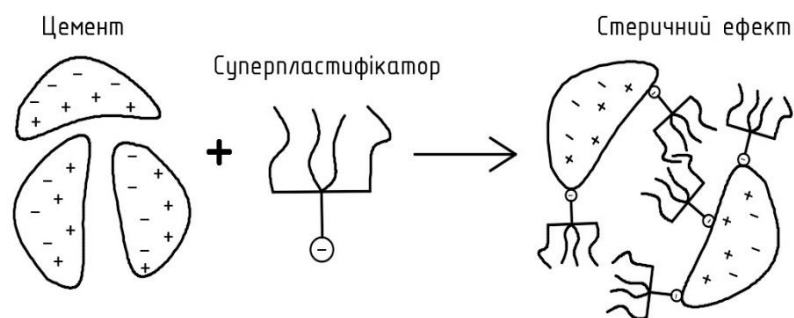


Рис. 1.17 Стеричний ефект дії суперпластифікатора

У [174] відзначається, що якісні пластифікатори мають не лише надавати високий редукуючий ефект, але і мінімально впливати на гідратаційну активність цементів в початковій фазі твердіння. Слід також відзначити дослідження [184], в яких важливу роль відіграє час додавання пластифікатору у бетонну суміш. Автори стверджують, що для кожного типу цементу існує оптимальний час додавання добавки в залежності від вмісту SO_3 в цементі. Тип суперпластифікатора також впливає на час додавання. Суперпластифікатори з вищим аніонним зарядом і молекулярною масою, з довшим основним ланцюгом, більшою щільністю бічних ланцюгів і коротшими бічними ланцюгами, можуть бути більш ефективними для покращення реологічних властивостей бетонних сумішей.

Застосування сучасних пластифікуючих добавок дозволяє раціонально використовувати портландцементи місцевого виробництва і отримувати високоякісні швидкотвердіючі бетони на їх основі. Важливо розуміти, що хіміко-мінералогічний склад в'язучого істотно впливає на водоредукуючий ефект пластифікатора, отже сумісність добавки пластифікатора і в'язучого необхідно визначати експериментальним шляхом [185, 186]. Окрім водоредукуючого ефекту пластифікуючі добавки знижують розшаровування, проникність та підвищують морозостійкість і корозійну стійкість бетонів.

Проте можливим є і певний негативний вплив пластифікатору – сповільнення кінетики раннього структуроутворення новоутворень і можливе підвищення деформацій усадки в результаті обезвожування бетонних сумішей з В/Ц нижче 0,3 [106]. Великі дозування суперпластифікатора впливають на в'язкість середовища та адсорбцію ПАВ на гідратних новоутвореннях, що призводить до уповільнення процесів твердіння бетону. Також разом з пластифікаторами використовують прискорювачі твердіння, які в свою чергу можуть вводитися окремо або входити у готові комплексні модифікатори [122, 187]. Таким чином, необхідно ретельно приділяти увагу підбору типу та кількості суперпластифікатора в залежності від особливостей складових бетону для ремонту і влаштування жорстких покриттів доріг.

Сучасні *прискорювачі твердіння* найчастіше являють собою добавки-електроліти на основі солі натрію або кальцію, не містять хлоридів, які можуть викликати корозію металевих елементів у конструкціях [107, 188, 189]. Для запобігання корозії сталевій арматури запропоновані добавки-прискорювачі, що включають у собі інгібітори. Прискорювачі твердіння діють як центри місць швидкого зародження продуктів гідратації цементу, особливо гідросилікатів кальцію CHS [168], що призводить до раннього зростання міцності, але знижують міцність на пізніх етапах твердіння. Завдяки активізації процесу гідратації цементу утворюється значна кількість гелю, який залучує до своїх осередків велику кількість рідкої фази, сприяючи швидшому зміцненню цементного каменю. Тип діючого компоненту прискорювача впливає на взаємодію з основними мінералами цементу. Наприклад, неорганічні прискорювачі більш активно діють з фазою C_3S , а органічні прискорювачі інтенсивніше взаємодіють із фазою C_3A [190]. Тобто, одна і та сама добавка може по різному впливати на ранні процеси структуроутворення в залежності від використаного в'язучого [191, 192]. Це треба враховувати при проектуванні складів бетонів дорожніх і аеродромних покриттів на різних типах цементу.

Вищеописані переваги сталевібробетону дозволяють застосовувати його в якості матеріалу для ремонту та влаштування жорстких дорожніх покриттів. Для досягнення найбільшої конструктивної і технологічної ефективності складів для ремонту і влаштування покриттів стоїть завдання підвищення ранньої міцності бетону із застосуванням оптимальної кількості суперпластифікатора та прискорювача твердіння.

1.5 Теоретичні передумови досліджень і наукова гіпотеза

При активному розвитку будівництва жорстких дорожніх та аеродромних покриттів важливим завданням є їх утримання у належному техніко-експлуатаційному стані як за рахунок забезпечення довговічності, так і за рахунок своєчасного та якісного проведення ремонтних робіт. Це, в свою чергу,

робить актуальною задачу розробки швидкотвердіючих бетонних композицій на основі місцевих будівельних матеріалів з забезпеченими фізико-механічними показниками. Такі бетони дають змогу якнайшвидшого відкриття трафіку після влаштування або ремонту покриття.

Проведений аналіз технічної літератури показав, що високі характеристики міцності, особливо у ранні строки твердіння (1-3 доби), не завжди можуть забезпечити необхідну якість жорсткого покриття після його ремонту або при влаштуванні. При високих значеннях усадки та низькій адгезії висока рання міцність бетону не забезпечить нормальні умови експлуатації покриттів, зокрема для відремонтованих ділянок. З врахуванням динамічних впливів від транспортних засобів важливо забезпечувати належну тріщиностійкість і зносостійкість бетону дорожніх та аеродромних покриттів.

Також для сумішей високоміцних швидкотвердіючих бетонів для влаштування та ремонту покриттів доріг та аеродромів важливо забезпечувати необхідні реологічні властивості без значного підвищення В/Ц відношення, яке, як відомо, впливає практично на всі властивості бетону, включаючи кінетику твердіння.

Таким чином, сформульована **робоча гіпотеза досліджень**.

Найбільш ефективними методами досягнення високої ранньої міцності бетону для ремонту та влаштування жорстких покриттів, зокрема на розтяг при згині, одночасно з високою зносостійкістю, тріщиностійкістю і морозостійкістю матеріалу, є використання сучасних суперпластифікаторів, прискорювачів твердіння та дисперсного армування. Також за рахунок раціонального підбору складу бетонних сумішей з поєднанням модифікаторів та дисперсного армування можливо забезпечити низькі показники усадки, що позитивно відобразиться на адгезії ремонтного матеріалу.

Довговічність бетонів для влаштування дорожніх і аеродромних покриттів має бути забезпечена з урахуванням умов експлуатації. Для ремонтних матеріалів довговічність не обов'язково повинна мати надвисокі значення, проте має задовольняти певним критеріям. Згідно регламентуючих

документів більшості країн достатньо, щоб ремонтний матеріал мав строк служби 4-5 років. У той же час показники ранньої міцності на стиск і розтяг при згині (1-3 доби твердіння) регламентуються кожним підрядником та замовником окремо, але логічно зауважити, що вони мають набувати певних значень, які будуть не менше проектних вимог до існуючого «старого» покриття доріг.

Виходячи з наведеної вище робочої гіпотези та спираючись на проведений аналіз технічної літератури, була сформульована *мета роботи*: розробка високоміцних швидкотвердіючих бетонів для ремонту і влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів з забезпеченою довговічністю за рахунок використання сталеві анкерної фібри, суперпластифікатора і прискорювача твердіння. Для досягнення поставленої мети роботи були сформульовані конкретні завдання дослідження, які наведені у вступі дисертації.

Висновки до розділу 1

1. Жорсткі цементобетонні покриття автомобільних доріг та аеродромів працюють в суворих умовах експлуатації, що поєднують у себе динамічні навантаження від дії транспортних засобів та одночасний вплив навколишнього середовища. Нормативні навантаження на вісь автотранспорту вже складають 115-130 кН на вісь. Сучасні повітряні судна також мають тенденцію до підвищення власної ваги, а отже і збільшення навантаження на покриття злітно-посадкових смуг. Під впливом вищеописаних факторів несуча здатність жорстких покриттів вичерпується ще у міжремонтні періоди. Таким чином, при вирішенні проблеми ремонту або швидкого влаштування цементобетонних покриттів необхідно використовувати швидкотвердіючі бетонні суміші, для можливості відкриття трафіку в найкоротший термін.

2. Бетони з високою ранньою міцністю (High-early strength concrete) необхідно проектувати з урахуванням сучасних водоредукуючих модифікаторів і прискорювачів твердіння, що дозволяють якісно використовувати вітчизняну

сировинну базу в'язучих без необхідності використання високомарочних, дефіцитних портландцементів. Зазвичай, швидкотвердіючі бетонні суміші мають доволі низькі значення В/Ц (0,3 і менше), через це може виникати зневоднення і збільшуватися деформації усадки. Одним із оптимальних рішень може бути дисперсне армування з використанням сталевोї фібри, що позитивно впливає на підвищення міцності на розтяг при згині, яка є основною в роботі плити на пружній основі.

3. За результатами проведеного аналізу технічної літератури сформульовані робоча гіпотеза і мета роботи.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристики вихідних матеріалів

При розробці швидкотвердіючих бетонних сумішей для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів як основний використовувався портландцемент ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 (СЕМ ІІ/А-С 42,5) виробництва ПрАТ «Дікергофф Цемент Україна». Хіміко-мінералогічний склад клінкеру даного цементу наведено у таблиці 2.1. Питома поверхня портландцементу складала 280 м²/кг.

Таблиця 2.1

Хіміко-мінералогічний склад клінкеру портландцементу ПЦ ІІ/А-ІІІ-500
виробництва ПрАТ «Дікергофф Цемент Україна»

Назва і позначення показника	Кількісне значення
Трикальцієвий силікат, C ₃ S	66,95 %
Двохкальцієвий силікат, C ₂ S	13,15 %
Трикальцієвий алюмінат, C ₃ A	7,42 %
Чотирьохкальцієвий алюмоферит, C ₄ AF	12,48 %
Оксид кальцію, CaO	64,49 %
Оксид кремнію, SiO ₂	20,32 %
Оксид алюмінію, Al ₂ O ₃	5,28 %
Оксид заліза (ІІІ), Fe ₂ O ₃	4,05 %
Оксид заліза (ІІ), FeO	-
Оксид магнію, MgO	0,74 %
Вміст іону хлору, Cl ⁻	-
Нерозчинний залишок, НЗ	0,28 %
Втрати при прожарюванні, ВПП	0,33 %

При порівнянні властивостей бетонів на різних типах цементів [193, 194], що проводилося на першому етапі роботи і що описано нижче, також використовувалися: пуцолановий портландцемент ПЦЦ IV/A-500 P (CEM IV/A(P) 42,5 R-SR), сульфатостійкий портландцемент ССПЦ400-Д0, портландцемент ПЦ-II/A-II-500 P-H (всі виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент»). Зокрема було визначено оптимальний тип цементу для приготування швидкотвердіючих бетонів і раціональну кількість суперпластифікатора BASF MasterGlenium SKY 608 [194], що описано у п.3.1-3.2.

Пуцолановий цемент ПЦЦ IV/A-500 P (CEM IV/A(P) 42,5 R-SR) мав вміст клінкеру 77% і вміст природної пуцолани 23%. У клінкері даного цементу вміст C_3A – 7,6%, вміст SO_3 – 2,34%, вміст Cl^- – 0,013%. Питома поверхня пуцоланового цементу ПЦЦ IV/A-500 P складала $541 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Сульфатостійкий портландцемент ССПЦ 400-Д0 не містив мінеральних добавок. У клінкері даного цементу вміст C_3A – 4,40%, C_3S – 48,64%, $\Sigma C_3A + C_4AF$ – 19,55%. Питома поверхня сульфатостійкого портландцементу складала $313 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Портландцемент ПЦ II/A-II-500 P-H мав вміст природної пуцолани 18%. У клінкері даного цементу вміст C_3A – 7,39%, C_3S – 59,59%, $\Sigma C_3A + C_4AF$ – 12,12%. Питома поверхня цементу ПЦ II/A-II-500 P-H складала $393 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Фізико-механічні властивості всіх портландцементів відповідали вимогам ДСТУ Б.В.2.7-46-2010 і ДСТУ Б EN 197-1:2015 [65, 160].

У якості активної мінеральної добавки в роботі був використаний метакаолін виробництва ТзОВ «Мета Д», хімічний склад якого представлений у таблиці 2.2. Метакаолін є продуктом випалення очищеної каолінітової глини при температурі 600-900 °С. При нагріванні каоліну ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot nH_2O$) за рахунок випаровування зв'язаної води деформується його кристалічна структура. В результаті утворюється негідратована реактивна форма, що складається з аморфного алюмосилікату – метакаоліну, який має високу пуцоланову активність [195, 196]. Метакаолін задовольняв вимогам [197].

Хімічний склад метакаоліну виробництва ТЗОВ «Мета Д»

Вміст оксидів, мас. %						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
53,42	43,8	0,75	0,45	-	-	-

Як дрібний заповнювач для приготування бетонних сумішей було використано кварцовий пісок Микитівського кар'єру (Миколаївська область). Крупним заповнювачем виступав гранітний щебінь Горіхівського кар'єру (Кіровоградська область). Обидва заповнювача відповідають вимогам державних стандартів ДСТУ Б В.2.7-32-95, ДСТУ Б В.2.7-75-98 і ДСТУ Б В.2.7-232:2010 [198-200].

Гранулометричний склад заповнювачів наведено у таблиці 2.3. Також гранулометричний склад щебеню і піску було порівняно з вимогами Європейського стандарту BS EN 12620:2013 [201] та стандарту США ASTM C 33/C33M-18 [202].

Як видно з наведеної порівняльної таблиці 2.3, гранулометричний склад використаних заповнювачів відповідає вимогам всіх трьох стандартів і вони можуть використовуватися для приготування бетонів і фібробетонів для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

У ролі пластифікуючої (водоредукуючої) добавки використовувався суперпластифікатор BASF MasterGlenium SKY 608 на основі ефірів полікарбосилату. Технічні характеристики даної добавки наведено у таблиці 2.4. Добавку BASF MasterGlenium SKY 608 було обрано за результатами попередніх експериментів як найбільш ефективну серед доступних на ринку України. Добавка сприяє значному зниженню В/Ц, що дозволяє отримувати бетонні суміші з швидким зростанням міцності при збереженні необхідної рухливості.

Таблиця 2.3

Порівняння зернового аналізу дрібних та крупних заповнювачів
відповідно до різних будівельних норм

Розмір сита, мм	% проходить по вазі		ДСТУ Б В.2.7-75-98	ДСТУ Б В.2.7-32-95	EN 12620:2013		ASTM C 33/C33M-18	
	Гранітний щебінь	Пісок	Гранітний щебінь	Пісок	Гранітний щебінь	Пісок	Гранітний щебінь	Пісок
20	100	100	≥ 90	-	90-99	-	90-100	-
10	54,7	100	20-70	-	-	-	20-55	100
5	5,0	100	0-10	-	0-15	100	0-10	95-100
2,5	0,8	97,0	-	80-100	0-5	85-99	0-5	80-100
1,25	0	83,5	-	55-95	-	-	-	50-85
0,63	0	48,3	-	30-80	-	-	-	25-60
0,315	0	28,6	-	20-50	-	-	-	5-30
0,16	0	8,5	-	0-15	-	-	-	0-10
< 0,16	0	0,5	-	-	-	-	-	-

У попередніх дослідженнях також використовувалася добавка полікарбоксилатного типу Coral ExpertSuid 5, яка виробляється компанією Coral з м. Запоріжжя на основі полімерів карбонових кислот і ефірів згідно ТУ У В.2.7-24.6-35365973-001:2008.

Таблиця 2.4

Технічні характеристики суперпластифікатора MasterGlenium SKY 608

Густина, кг/л	Рівень рН	Вміст хлоридів, мас. %	Вміст лугів, мас. %
1,07-1,11	5-7	< 0,1	< 3 %

Для прискорення твердіння сумішей для влаштування та ремонту жорстких покриттів використовувалася добавка SikaRapid 3, що не містить хлоридів і може застосовуватися для виготовлення сталевібробетонних композицій. Вибір добавки здійснено з врахуванням рекомендацій виробників (BASF та Sika) і результатів попередніх експериментів. Технічні характеристики даної добавки представлені у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Технічні характеристики прискорювача твердіння SikaRapid 3

Густина, кг/л	Рівень рН	Вміст хлоридів, мас. %	Вміст лугів, мас. %
1,37	7,5-8,5	< 0,1	< 2 %

Для дисперсного армування використовувалася сталевана анкерна фібра довжиною 50 мм та діаметром 1 мм, з тимчасовим опором 1150-2300 МПа виробництва Стальканат Сілур (м. Одеса), рис. 2.1.



Рис. 2.1 Сталева анкерна фібра виробництва Стальканат Сілур м. Одеса

Фібра відповідає вимогам DIN EN 14889-1-2006 [203]. Такий тип дисперсної арматури було обрано з врахуванням її високої корозійної стійкості за результатами попередніх пошукових експериментів. Дослідження корозійної стійкості бетону проводили в рідкому агресивному сульфатному середовищі з

концентрацією SO_4^{2-} 10000 мг/л (розчин Na_2SO_4). Після двох місяців витримки, проводилися випробування міцності на стиск і розтяг при згині. Втрати міцності і ознак кородування сталевих фібри не було виявлено.

У попередніх дослідженнях також використовувалася поліпропіленова фібра «MicroArm» виробництва ТОВ «ДІФ» (м. Дніпро) з довжиною волокон 12 мм і діаметром 20 мкм, яка мала питому вагу 0,91 г/см³, температуру плавлення 162°C, температуру запалювання 593°C.

Для приготування бетонних і фібробетонних сумішей використовувалася водопровідна вода, яка відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011 «Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови» [204].

2.2 Методи досліджень

Проектування базових складів швидкозастійних бетонів для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів проводилось на основі ДСТУ Б В.2.7-215:2009 і ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 [205, 206].

Перемішування бетонних сумішей проводилося в змішувачі примусового типу.

Рухомість бетонних сумішей визначалася за величиною осадки стандартного конуса згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002 [207].

Бетонні зразки кубу 10×10×10 см і призми 10×10×40 см виготовляли згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [208]. Твердіння зразків відбувалося в нормальних умовах при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$ і вологості $95 \pm 5\%$.

Випробування бетонів на міцність на стиск і міцність на розтяг при згині проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [208].

Середню густину і пористість досліджених бетонів і фібробетонів для автомобільних доріг та аеродромів визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» [209].

Визначення стираності бетонів проводилося відповідно вимог ДСТУ Б В.2.7-212:2009 [210]. Зразки куби розміром $7 \times 7 \times 7$ см вирізалися зі зразків $10 \times 10 \times 10$ см, тому що максимальна крупність заповнювача становила 20 мм. Випробування проводилися на лабораторному колі стираності ЛКИ-3.

Морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх і аеродромних покриттів визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 за третім прискореним методом [211] при температурі заморожування до -50°C , рис. 2.2. Марка за морозостійкістю визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96 [212].



Рис. 2.2 Проведення випробування ремонтних бетонів на морозостійкість (3й прискорений метод)

Деформації усадки визначали на бетонних зразках-призмах з розмірами $10 \times 10 \times 40$ см згідно ДСТУ Б В.2.7-216:2009 [217], рис. 2.3.

Рентгенофазовий аналіз структури ремонтних бетонів (цементно-піщаної матриці даних бетонів) проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 в монохроматизованому $\text{Co-K}\alpha$ випромінюванні ($\lambda = 1,7902\text{\AA}$). Ідентифікація конкретних сполук у матриці (фаз) проводилася завдяки порівнянню міжплощинних відстаней (d , \AA) і відносних інтенсивностей ($I_{\text{отн}}/I_0$) експериментальної кривої з даними електронної картотеки PCPDFWIN.



Рис. 2.3 Визначення усадки ремонтних бетонів

При проведенні досліджень фізико-механічних властивостей бетонів і фібробетонів та для аналізу їх результатів на більшості етапів роботи застосовувалися методики оптимального планування експерименту і експериментально-статистичного моделювання [214-216]. При розрахунку експериментально-статистичних (ЕС) моделей впливу варійованих факторів на властивості бетонів виконувався перехід від натурних перемінних до кодованих, тобто до таких, що знаходяться у діапазоні від -1 до $+1$. Перехід виконувався за типовою формулою [214, 215]:

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

Для розрахунку і статистичного аналізу ЕС-моделей впливу варійованих факторів складу на фізико-механічні властивості досліджених бетонних

сумішей, бетонів і фібробетонів використовувалася діалогова система COMPEX, яка розроблена в Одеській державній академії будівництва та архітектури під керівництвом проф. В.А. Вознесенського [214, 215, 217].

Розрахунок коефіцієнтів ЕС-моделі проводився з урахуванням прийнятої помилки експерименту при 10% двосторонньому ризику, тобто при $\alpha=0,1$. Для заданого рівня ризику після кожного розрахунку здійснювалася перевірка гіпотези про відмінність оцінок коефіцієнтів ЕС-моделі від нуля, тобто перевірялася значимість коефіцієнтів. Для перевірки гіпотези про рівність розрахованих коефіцієнтів b_i нулю використовувався критерій Гаусовської точності. Коефіцієнти, які за результатами перевірки не відрізнялись від нуля, тобто не були значущими, послідовно виключалися з ЕС-моделі. Після виключення незначущих коефіцієнтів модель автоматично повторно розраховувалася і перевірка повторювалася. Після послідовно проведеного аналізу ЕС-модель з усіма значущими оцінками коефіцієнтів перевірялася на адекватність за критерієм Фішера. У випадку, коли критерій Фішера був менше критичного для заданого рівня ризику з урахуванням отриманого числа ступенів свободи, тобто $F_a < F_{кр}(\alpha, f_{на}, f_3)$, ЕС-модель визнавалася адекватною, тобто прийнятною для аналізу і прийняття інженерних рішень. При записі поліномів багатofакторних ЕС-моделей на місці скорочених незначущих елементів записувався коефіцієнт, рівний нулю, тобто вказувалося значення ± 0 .

2.3 Схеми проведення досліджень

Проведений аналіз наукових публікацій показав, що основними в'язучими для виробництва швидкотвердіючих бетонів для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів виступають цементы типу I – рядовий портландцемент, типу III – швидкотвердіючий цемент і портландцемент типу V – з високою сульфатостійкістю згідно [66]. В Україні швидкотвердіючі цементы не виробляються і практично не імпортуються. Отже

на *першому етапі* роботи було проведено порівняння властивостей бетонів на основі пуцоланового портландцементу ПЦЦ IV/A-500 P (CEM IV/A(P) 42,5 R-SR) як альтернативи цементу типу V та бетонів на портландцементі ПЦ II/A-III-500 (CEM II/A-S 42,5). Портландцемент ПЦ II/A-III-500 (CEM II/A-S 42,5) широко виробляється в Україні та розглядався у якості більш економічного варіанту з врахуванням значних обсягів бетонних робіт на автомобільних дорогах. Результати першого етапу описані у п.3.1 дисертації.

Як показано у дослідженнях [218-222] завдяки сучасним методам проектування бетонів із застосуванням хімічних добавок нового покоління і дисперсного армування можна досягати високих фізико-механічних характеристик бетону та показників його довговічності. Відповідно на *другому етапі* роботи проводились попередні пошукові дослідження фізико-механічних характеристик дисперсно-армованих бетонів з використанням поліпропіленової фібри і метакаоліну. Введення фібри обумовлено покращенням таких показників дорожніх бетонів, як зниження усадки, підвищення міцності і тріщиностійкості та зниження стираності, що описано у п.1.4. В свою чергу, використання активної мінеральної добавки також позитивно впливає на вищезазначені властивості. Було порівняно властивості отриманих бетонів з різною кількістю в'язучого ПЦ II/A-III-500 (CEM II/A-S 42,5). Результати другого етапу описані у п.3.2 дисертації.

На *третьому етапі* на основі оптимальних складів бетонних сумішей з використанням цементів ПЦ II/A-III-500 (CEM II/A-S 42,5) і ПЦЦ IV/A-500 P(CEM IV/A(P) 42,5 R-SR) досліджувався вплив кількості добавки пластифікатору MasterGlenium SKY 608 на структуру і фізико-механічні характеристики бетону, а саме, міцність на стиск і розтяг при згині у віці 3 і 28 діб та морозостійкість [223]. Була визначена оптимальна кількість пластифікатору MasterGlenium SKY 608. Результати третього етапу описані у п.3.3 дисертації.

На *четвертому етапі* досліджувався вплив метакаоліну на ранню і проектну міцність, морозостійкість та стираність (як показники, що визначають

довговічність) та усадку бетонів для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів [224]. Результати четвертого етапу роботи описані у п.3.4 дисертації.

П'ятий етап роботи описано у розділі 4 і присвячено вивченню властивостей фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів. Вивчено вплив кількості прискорювача твердіння та сталеві анкерної фібри на властивості бетонних сумішей і бетонів. Розробка швидкотвердіючих бетонів та фібробетонів орієнтована на застосування їх при ремонті глибиною від 1/3 до повної товщини пошкоджених цементобетонних плит покриття (full-depth repair), а також на влаштування нових жорстких покриттів. Були визначені характеристики міцності та довговічності бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів, а також деформації усадки та адгезійна міцність як важливі показники для ремонтних матеріалів дорожніх покриттів. Також на даному етапі роботи було обрано оптимальні склади швидкотвердіючих фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

При дослідженні фізико-механічних властивостей, структури бетонів і фібробетонів для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів, тобто на п'ятому етапі роботи, за оптимальним симетричним 9-ти точним планом проводився 2-х факторний експеримент [214-217, 225], в якому варіювалися наступні фактори складу, як основні для забезпечення високої якості бетону для дорожньої галузі:

X_1 – кількість добавки прискорювача твердіння Sika Rapid 3, від 0 до 2,4 % від маси цементу (від 0 до 9,6 кг/м³);

X_2 – кількість сталеві анкерної фібри діаметром 1 мм і довжиною 50 мм, від 0 до 100 кг/м³.

Склад бетонної суміші корегувався в залежності від кількості введеної дисперсної арматури та модифікаторів. План експерименту та склади досліджених у 9-ти експериментальних точках бетонів та фібробетонів наведені у таблиці 4.1.

Шостий етап роботи присвячений впровадженню у виробництво ремонтних складів стлефібробетонів з високою ранньою міцністю, що описано у розділі 5 дисертації.

Висновки до розділу 2

1. Наведені основні характеристики використаних в дослідженнях матеріалів для приготування бетонів і фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів: портландцементів ПЦ II/A-III-500 (як основного), ПЦЦ IV/A-500 P, ССПЦ 400-Д0, ПЦ II/A-II-500 P-Н, щебеню, піску, суперпластифікатора, прискорювача твердіння, метакаоліну, сталеві фібри.

2. Описані методи досліджень фізико-механічних властивостей і структури бетонів і фібробетонів жорстких покриттів.

3. Описана загальна схема проведення досліджень.

4. Наведено варійовані фактори складу в експериментальних дослідженнях властивостей фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів.

5. Прийнята загальна схема досліджень та використані методи проведення досліджень і матеріали дають можливість вирішити поставлені завдання та досягнути мети роботи.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СКЛАДІВ І ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЕТОНІВ ДЛЯ РЕМОНТУ ТА ВЛАШТУВАННЯ ЖОРСТКИХ ПОКРИТТІВ

Постійне зростання транспортних і авіаперевезень вимагає підвищення якості дорожніх одягів. Світова тенденція будівельно-транспортної індустрії показала, що будівництво доріг і аеродромів із жорстким типом покриття збільшується, а термін служби багатьох з існуючих покриттів транспортних розв'язок і аеродромних смуг є вичерпаним [50, 226, 227]. В Україні в останні роки теж активно будуються дороги та аеродромні комплекси з використанням жорстких покриттів [1]. Отже, все більш актуальною є задача розробки високофункціональних бетонів дорожніх покриттів, а також все частішою стає необхідність проведення ремонту з подальшим максимально швидким відкриттям трафіку. При цьому, як стратегія все частіше застосовується повномасштабний, глибинний ремонт (full-depth repair) з використанням швидкотвердіючих бетонних сумішей [55, 227]. Глибинний ремонт передбачає заміну шару покриття від 1/3 до повної його товщини.

На етапі роботи, який описано у даному розділі, дослідження сфокусовано на підборі складів модифікованих бетонів для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів з раціональним типом портландцементу і раціональною кількістю ефективного суперпластифікатора на основі ефіру полікарбонату, а також на дослідженні структури і властивостей даних бетонів.

Згідно з даними XXI Всесвітнього дорожнього конгресу [50] і даними джерел [90, 226, 228] частка доріг з жорстким покриттям в різних країнах наступна: США – 60%, Австрія – 46%, Бельгія – 41%, Німеччина – 31%, Франція – 20 %, Нідерланди – 15%, Португалія – 10%, Іспанія, Італія, Канада, Швейцарія, Великобританія <5%, Україна – 1,92%. Проте, як відмічалось вище, в нашій країні частка доріг з цементобетонними покриттями швидко зростає. Але,

разом з тим, більшість доріг було побудовано понад 40 років тому і регулярно потребує капітального ремонту або реконструкції.

Основними вимогами до ремонтних складів дорожніх покриттів є їх висока рання міцність (1-3 доба) при забезпеченні необхідної проектної міцності. Для відкриття трафіку можуть бути використані різні вимоги до міцності бетону [62, 230, 231, 233], які регламентовані національними та іншими нормативами. Значного поширення набула технологія швидкотвердіючих ремонтних складів бетону. Згідно ГБН В.2.3-37641918-557:2016 [229], міцність ремонтного бетону в 28-ми добовому віці повинна бути не менше проектної міцності існуючого бетонного покриття, наприклад, для дороги категорії І-б це клас бетону С30/35, для доріг категорії І-а – С32/40. Однак, у зв'язку з відсутністю спеціальних нормативних документів на ремонтні бетонні суміші в Україні і спираючись на досвід інших країн, міцність ремонтного бетону має корегуватися з урахуванням необхідних темпів введення ділянки дороги або смуги аеропорту в експлуатацію, навантаження на покриття та регіону проведення ремонтних робіт.

Розробка ефективних бетонів для влаштування жорстких дорожніх покриттів, тобто для нового будівництва, також є актуальним і важливим завданням, яке має вирішуватися з врахуванням наявних на ринку України в'язучих, модифікаторів і заповнювачів.

3.1 Дослідження впливу різних типів цементу на властивості дорожніх бетонів

Аналіз літературних джерел, наведених у п.1.3 дисертації, дозволяє зробити висновок, що найпоширенішими в'язучими для приготування швидкотвердіючих бетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів є цементу типу ІІІ – швидкотвердіючий, V – з високою сульфатостійкістю згідно [66]. Відзначимо, що цементу типу ІІІ є дефіцитними на території України і фактично в нашій країні не виробляються. В свою чергу

достатньо близьким за складом до цементів типу V можна вважати цемент ПЦЦ IV/A-500 P. Сульфатостійким на ринку України є портландцемент ССПЦ400-Д0, решта сульфатостійких в'язучих на ринку є шлакопортландцементами. Підвищеною сульфатостійкістю та ранньою міцністю характеризується цемент ПЦ-П/A-П-500 P-Н. Всі перелічені цементи виробляються ПрАТ «Івано-Франківськцемент», а цемент ПЦ-П/A-П-500 P-Н навіть рекомендується цим виробником як одне з в'язучих для дорожніх покриттів.

На *першому етапі* досліджень було проведено порівняння фізико-механічних властивостей бетонів класу С30/35 на основі вищевказаних цементів [193], а також на основі цементу ПЦ П/A-Ш-500 виробництва ПрАТ «Дікергофф Цемент Україна» у якості більш економічного варіанту, зокрема, з точки зору логістики при влаштуванні і ремонті дорожніх та аеродромних покриттів на півдні України.

Бетонні склади проектувалися без хімічних добавок, рухомість бетонних сумішей становила S2. Відсутність хімічних добавок в бетонах при проведенні експериментів була обумовлена необхідністю коректного порівняння властивостей бетонів на різних цементах без впливу модифікаторів, які можуть мати різну ефективність для різних типів в'язучих. Рухомість суміші відповідала найбільш розповсюдженим вимогам щодо технологічності бетонів для ремонту та влаштування цементобетонних покриттів.

Підбір складів бетонів на всіх типах цементів був проведений згідно ДСТУ Б В.2.7-215:2009 «Бетони. Правила підбору складу» [205] за методом абсолютних об'ємів. Склади підібраних бетонів на всіх типах цементів наведені у таблиці 3.1. Всі склади забезпечували необхідний клас С30/35 при прийнятному коефіцієнті варіації 13%. Завдяки різній активності в'язучих при забезпеченні заданого класу бетону розрахункова витрата портландцементів відрізнялася.

Таблиця 3.1

Склади підібраних бетонів класу С30/35 на різних типах цементу
(рухомість бетонної суміші S2, максимальна крупність щебеню 20 мм)

Вид цементу	Цемент, кг/м ³	Щебінь, кг/м ³	Пісок, кг/м ³	Вода, л/м ³	В/Ц
сульфатостійкий портландцемент ССПЦ400-Д0	433	1179	585	202	0,467
портландцемент ПЦ-П/А-П-500 Р-Н	413	1187	606	190	0,460
портландцемент ПЦЦ IV/А-500 Р	432	1150	605	222	0,514
портландцемент ПЦ П/А-Ш-500	400	1170	642	201	0,503

Для всіх чотирьох бетонів підібраних складів визначалися: міцність при стиску у віці 7 і 28 діб, морозостійкість та водопоглинання. Дані про міцність і водопоглинання досліджених бетонів наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Міцність на стиск у віці 7, 28 діб і водопоглинання досліджених бетонів

Вид цементу	Міцність $f_{ck.cube.7}$ у віці 7 діб, МПа	Міцність $f_{ck.cube}$ у віці 28 діб, МПа	Водопогли- нання
сульфатостійкий портландцемент ССПЦ400-Д0	37,8	49,7	5,0
портландцемент ПЦ-П/А-П-500 Р-Н	42,8	49,3	4,7
портландцемент ПЦЦ IV/А-500 Р	39,5	48,9	5,3
портландцемент ПЦ П/А-Ш-500	39,1	51,3	4,9

Аналіз наведених у таблиці даних показує, що на 7 добу твердіння міцність бетонів відрізнялася не суттєво і становила від 37,8 до 42,8 МПа. У проектному віці, виходячи з умов експерименту, міцність досліджених бетонів відповідала

їх класу. Водопоглинання бетонів було у діапазоні 4,7..5,3%, що задовольняє вимозі ДСТУ Б В.2.7-42-97 [230] для всіх бетонів, крім бетону на основі ПЦЦ IV/A-500 P. Через найвище В/Ц бетону на портландцементі ПЦЦ IV/A-500 P, що обумовлено більшою водо потребою в'язучого, водопоглинання цього складу було найбільшим.

Також встановлено, що морозостійкість всіх досліджених бетонів становила F200 при визначенні прискореним методом згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 [211] як для «всіх видів бетонів» (важких конструкційних), або F100 при визначенні за методикою як для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів.

Тобто з урахуванням вартості в'язучого та його витрати найбільш раціональними для бетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів можна вважати цементи ПЦ-П/A-П-500 P-Н виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент» і ПЦ П/A-Ш-500 виробництва ПрАТ «Дікергофф Цемент Україна». Проте слід зазначити, що з весни 2020 року до сьогодні (кінець 2022 року) ПрАТ «Івано-Франківськцемент» не виробляє портландцемент ПЦ-П/A-П-500 P-Н, відповідно його не можна розглядати як масове в'язуче для бетонів дорожніх покриттів, зокрема для ремонтних.

Портландцемент ПЦЦ IV/A-500 P можна вважати умовно перспективним з точки зору використання в'язучого з низькою кількістю клінкерної складової [231, 232], проте через підвищену водо потребу можливість його використання в модифікованих сучасними добавками бетонах дорожніх покриттів вимагає додаткових досліджень, що описано нижче.

3.2 Дослідження властивостей модифікованих, дисперсно-армованих бетонів з поліпропіленовою фіброю

Як зазначалося вище, основними показниками якості, що обумовлюють довговічність бетонів дорожніх покриттів в кліматичних умовах більшості європейських країн, є морозостійкість та зносостійкість. Тому покращення цих

показників дозволяє подовжити міжремонтні інтервали і відповідно знизити витрати на утримання доріг.

Ефективним методом підвищення міцності, морозостійкості, тріщиностійкості і зносостійкості бетонів дорожніх покриттів є застосування фібри [12, 233, 234]. Армування фіброю дозволяє знизити товщину дорожнього покриття без зниження його несучої здатності [2]. Покращення властивостей бетонів при застосуванні фібри пояснюється здатністю волокон сприймати розтягуючі напруження, а також зниженням деформацій усадки і набухання [79]. При цьому, як показано у п.1.4, досягти високої довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів можливо тільки при використанні ефективних модифікаторів, і в першу чергу полікарбоксилатних суперпластифікаторів. Молекулярна структура полікарбоксилатів сприяє прискоренню гідратації цементу, а дисперсійний ефект і швидка адсорбція молекул води на частинках цементу дозволяють збільшити поверхню реакцій гідратації [235].

Пуцолани, включаючи метакаолін, також є досить ефективними модифікаторами для підвищення міцності бетону жорстких покриттів [236-238]. Метакаолін впливає на процес формування структури цементної матриці, допомагає зменшити проникність бетону та підвищити його морозостійкість [201, 239]. Крім того, застосування метакаоліну дає змогу отримувати високоміцні бетони до класу C50/60 та впливати на міцність у ранньому віці [240]. Однак метакаолін має високу дисперсність і забезпечує позитивний ефект лише при спільному застосуванні з пластифікатором для зменшення кількості води у суміші [195, 242-244].

На даному (другому) етапі попередніх досліджень, проведеному сумісно з колегами з Одеської державної академії будівництва та архітектури А.В. Мішутіним і Л. Кінтею [241], при проведенні експерименту варіювалися наступні фактори складу бетону дорожнього покриття: кількість портландцементу ПЦ П/А-Ш-500 (виробництва ПрАТ «Дікергофф Цемент Україна»), від 400 до 500 кг/м³; кількість поліпропіленової фібри (довжина 12 мм, діаметр 20 мкм), від 0 до 2 кг/м³; кількість метакаоліну, від 0 до 30 кг/м³;

кількість добавки полікарбоксилатного типу Coral ExpertSuid-5, від 0,6 до 1% від маси цементу. У якості заповнювачів використовувалися щебінь фракції 5-10 мм і кварцовий пісок з модулем крупності 2,7.

Рівна рухливість була досягнута шляхом зміни кількості води, тобто співвідношення В/Ц залежало від складу бетонної суміші. Встановлено, що В/Ц досліджуваних сумішей залежно від складу змінювалося в межах від 0,33 до 0,49. Зі збільшенням вмісту цементу В/Ц сумішей зменшувалося, використання фібри викликає необхідність збільшення В/Ц для збереження необхідної легкоукладальності суміші. Через додаткову водопотребу при введенні метакаоліна В/Ц збільшується на 5-8%. Збільшення кількості добавки полікарбоксилату з 0,6 до 0,8..0,9% від маси цементу зменшує В/Ц суміші на 10..13%.

За відповідною експериментально-статистичною (ЕС) моделлю була побудована наведена на рис.3.1 діаграма, яка відображає вплив вмісту метакаоліну та суперпластифікатора на міцність на стиск дисперсно-армованого бетону при середніх дозуваннях цементу та поліпропіленової фібри [241]. Аналіз діаграми показує, що раціональний вміст метакаоліну з точки зору забезпечення підвищеної міцності на стиск становить від 15 до 20 кг/м³, а раціональна кількість суперпластифікатора Coral ExpertSuid-5 знаходиться в діапазоні від 0,8 до 0,9% від маси цементу.

Як зазначалося вище, міцність на розтяг при згині є важливою характеристикою дорожнього покриття. Встановлено, що введення поліпропіленової фібри збільшує міцність бетону на розтяг при згині на 0,5-0,9 МПа. Завдяки дисперсному армуванню та комплексній модифікації полікарбоксилатним суперпластифікатором і метакаоліном міцність на розтяг при згині бетону жорстких дорожніх покриттів збільшується на 1,2..1,4 МПа і досягає 8,5..9,3 МПа. Тобто використання раціональної кількості модифікаторів і поліпропіленового волокна може досить відчутно збільшити міцність бетону для дорожніх покриттів.

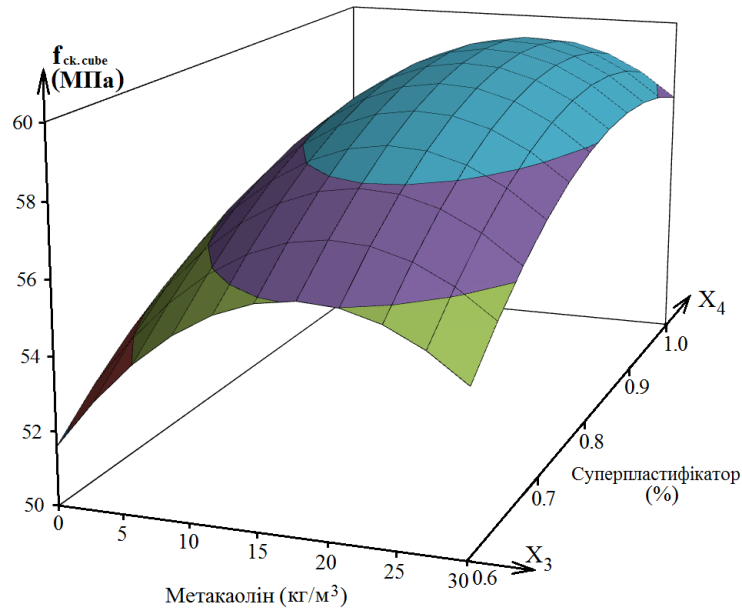


Рис. 3.1 Вплив кількості метакаоліну та суперпластифікатора Coral ExpertSuid-5 на міцність на стиск дисперсно-армованого бетону (вміст цементу – 450 кг/м³, поліпропіленової фібри – 1 кг/м³)

Відомо, що на дорожні покриття одночасно впливають експлуатаційні та кліматичні фактори – зміна температури, циклічне замерзання та відтавання, зволоження та висушування, навантаження та динамічний вплив від транспорту. Кількість циклів заморожування та розморожування покриттів може бути значно більшою за кількість переходів температури повітря через 0°C. В таких умовах основними показниками якості, що забезпечують довговічність бетону для жорстких покриттів, є морозостійкість та зносостійкість. Водночас морозостійкість характеризує стійкість бетону не тільки в умовах замерзання та відтавання, а й в умовах циклічних змін температури вище 0°C.

Діаграми на рис.3.2, побудовані за відповідними ЕС-моделями, відображають вплив кількості метакаоліну та суперпластифікатора (рис.3.2.а), а також поліпропіленової фібри та суперпластифікатора (рис.3.2.б) на морозостійкість бетону (визначену за методикою як для «всіх видів бетону», тобто як для конструкційних матеріалів).

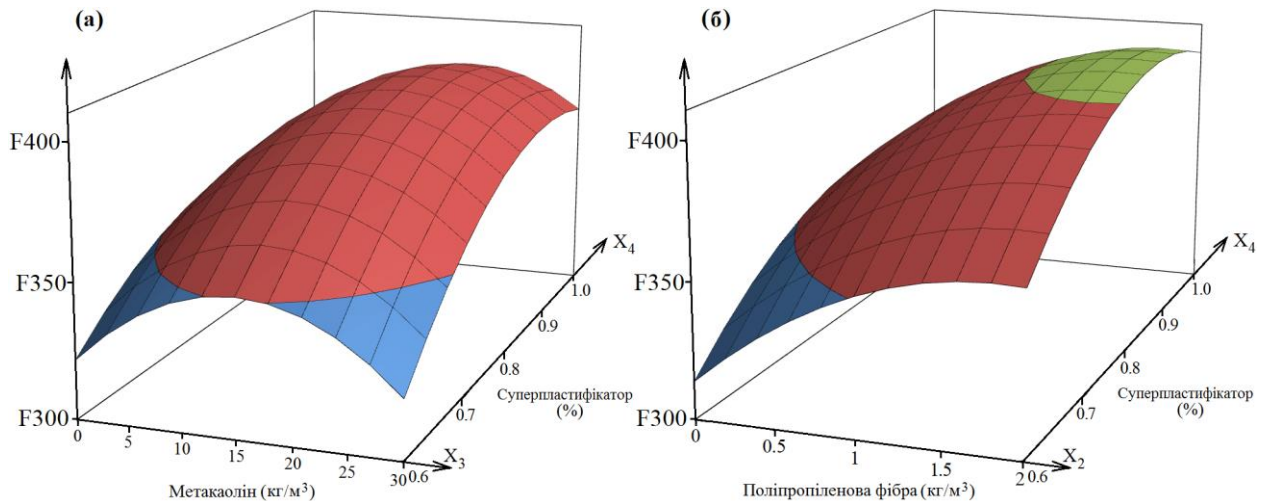


Рис. 3.2 Вплив кількості метакаоліну та суперпластифікатора (а), поліпропіленової фібри та суперпластифікатора (б) на морозостійкість бетону, визначену за методикою як для «всіх видів бетону» (дозування не представлених факторів знаходиться на середньому рівні)

Аналіз діаграм на рис.3.2 показує, що завдяки використанню раціональної кількості суперпластифікатора Coral ExpertSuid-5 (0,8..0,9%), метакаоліну та армування поліпропіленовою фібровою у кількості 1-1,5 кг/м³, морозостійкість збільшується приблизно на 100 циклів порівняно з бетонами, модифікованими мінімальною кількістю суперпластифікатора та без фібри (при визначенні за методикою як для «всіх видів бетону»).

Також була проаналізована стираність досліджених на даному етапі роботи бетонів жорстких покриттів. Аналіз відповідної ЕС-моделі показав, що найбільш значний вплив на зносостійкість має кількість цементу та фібри, а найменшій – вміст метакаоліну. Відповідно, для більш детального аналізу впливу кількості суперпластифікатора та поліпропіленового волокна на стираність була побудована наведена на рис.3.3 діаграма.

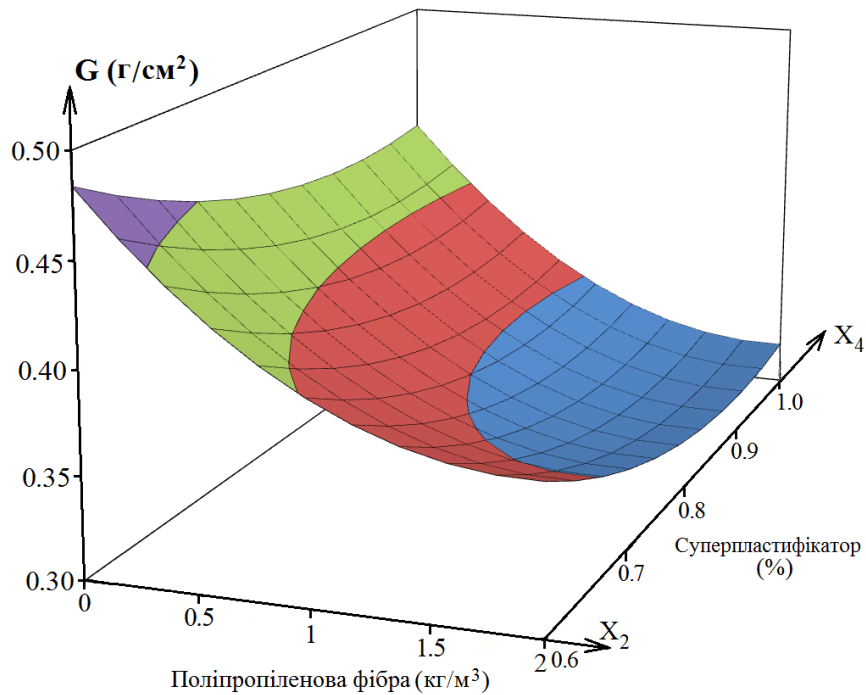


Рис. 3.3 Вплив кількості поліпропіленової фібри та суперпластифікатора Coral ExpertSuid-5 на стираність бетонів (вміст цементу – 450 кг/м^3 , метаксаоліну – 15 кг/м^3)

Аналіз діаграми показує, що дисперсне армування є ефективним методом для підвищення стійкості бетону жорстких дорожніх покриттів до стирання. Завдяки застосуванню поліпропіленового волокна в кількості $1,5\text{-}2 \text{ кг/м}^3$ стираність бетону зменшилася на $0,11\text{-}0,16 \text{ г/см}^2$, що залежно від складу дорівнює від 22 до 35%. Суперпластифікатор також позитивно впливає на стійкість бетону до стирання. Завдяки збільшенню кількості суперпластифікатора з 0,6 до 0,9% В/Ц суміші зменшується, відповідно збільшується міцність бетону, що зменшує значення його стираності. Комплексне застосування раціональної кількості фібри і суперпластифікатора дозволяє зменшити стираність бетону на 40 %.

Таким чином, використання дисперсного армування та раціональної кількості модифікаторів дає можливість отримувати бетони для жорстких покриттів з високою міцністю та довговічністю за рахунок збільшення морозостійкості та зменшення стираності. На даному етапі досліджень [241] завдяки використанню оптимальної кількості полікарбонатного

суперпластифікатора, метакаоліну та дисперсного армування поліпропіленовим волокном отримано бетони для жорстких дорожніх покриттів із міцністю на стиск до 55..71 МПа, міцність на розтяг при згині до 8,5..9,3 МПа і високою морозостійкістю та зносостійкістю, що забезпечує їх достатню довговічність в типових умовах експлуатації.

Проте використання поліпропіленового волокна вимагає постійного контролю якості перемішування суміші через досить складний процес розподілу дрібних волокон у матеріалі, чого важко досягнути при виконанні бетонування, зокрема при ремонтних роботах. Крім того, поліпропіленове волокно має низьку ефективність з точки зору підвищення міцності бетону на розтяг при згині, що важливо для дорожніх покриттів і в першу чергу для ремонтних матеріалів. Відповідно в подальших дослідженнях (розділ 4) у якості дисперсної арматури для бетону, що використовується під час ремонту і влаштування дорожніх та аеродромних покриттів було використано сталеву фібру, яка простіше розподіляється у суміші і більш ефективно впливає на міцність бетону, зокрема на міцність на розтяг при згині. Окрім того, як описано у п.1.1 сталева фібра якісно працює у бетонах дорожніх покриттів і широко використовується у світовій дорожньо-будівельній практиці. Також в подальших дослідженнях було використано більш ефективний суперпластифікатор (MasterGlenium SKY 608), який дозволив досягнути меншого В/Ц при необхідній рухливості суміші.

3.3 Дослідження впливу суперпластифікатора на В/Ц ремонтних бетонів на різних типах цементу

Як зазначалося вище, на сучасному етапі розвитку будівельної індустрії найбільш ефективними є суперпластифікатори полікарбосилатного типу, які завдяки впливу на водопотребу суміші дозволяють істотно підвищити міцність і поліпшити інші властивості бетону без збільшення кількості цементу, при цьому здатні зберігати легкоукладальність бетонної суміші протягом 1,5..2

годин [242]. В Україні недостатньо розвинена технологія влаштування і ремонту жорстких покриттів, а нормативна база, що регламентує виготовлення бетонів для ремонту покриттів, практично відсутня. Розробки і дослідження в даному напрямку дозволять створити технічні умови з рекомендаціями для глибинного ремонту та влаштування жорстких дорожніх одягів із застосуванням швидкотвердіючих бетонів, що є актуальним завданням.

На даному (третьому) етапі досліджень з врахуванням описаних у п.3.1 результатів визначалася раціональна кількість суперпластифікатора полікарбосилатного типу у бетонах на різних типах цементу. Досліджувалися бетони на 2-х типах центів: ПЦ II/A-III-500 виробництва ПрАТ «Дікергофф Цемент Україна» і пуцоланового портландцементу ПЦЦ IV/A-500 Р виробництва ПрАТ «Ивано-Франківськцемент».

Використовувався суперпластифікатор BASF MasterGlenium Sky 608 на основі ефірів полікарбосилату, кількість якого варіювалася від 0,8 до 1,4 % від маси цементу з кроком 0,2 %. Даний суперпластифікатор у порівнянні з дослідженням, описаними у п.3.2, де використовувався Coral ExpertSuid-5, [241] надає кращий водоредукуючий ефект на бетонну суміш і, як наслідок, покращує фізико-механічні показники бетону. Також виготовлялися бетони без модифікатора (не модифіковані склади бетонів). Витрата в'язучого у всіх досліджених на даному етапі роботи бетонах складала 400 кг/м^3 [194].

Рухомість всіх бетонних сумішей складала S2 (OK = 6...7 см), що відповідає найбільш поширеній рухомості сумішей для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів. Було виготовлено 10 партій зразків бетону. Склади і В/Ц досліджених бетонів наведені у таблиці 3.3.

Застосовувана добавка суперпластифікатор істотно знизила В/Ц сумішей в порівнянні з контрольними не модифікованими бетонами складів № 1 і 6 при збереженні їх рухливості. На рис. 3.4 відображено вплив кількості добавки MasterGlenium SKY 608 і типів цементу на В/Ц сумішей (за даними Таблиці 3.3).

Склади досліджених бетонів і В/Ц бетонних сумішей
(марка за легкоукладальністю S2)

№	Тип цементу	Цемент, кг/м ³	Щебінь, кг/м ³	Пісок, кг/м ³	Добавка MasterGlenium SKY 608, %	Вода, л/м ³	В/Ц
1	ПЦЦ IV/A-500 P	400	1140	705	-	216,8	0,542
2				735	0,8	188,4	0,471
3				740	1,0	181,6	0,454
4				755	1,2	148,4	0,371
5				750	1,4	160,8	0,402
6	ПЦ II/A-III-500	400	1140	720	-	200,8	0,502
7				765	0,8	148,4	0,371
8				785	1,0	125,2	0,313
9				800	1,2	116,8	0,292
10				795	1,4	119,2	0,298

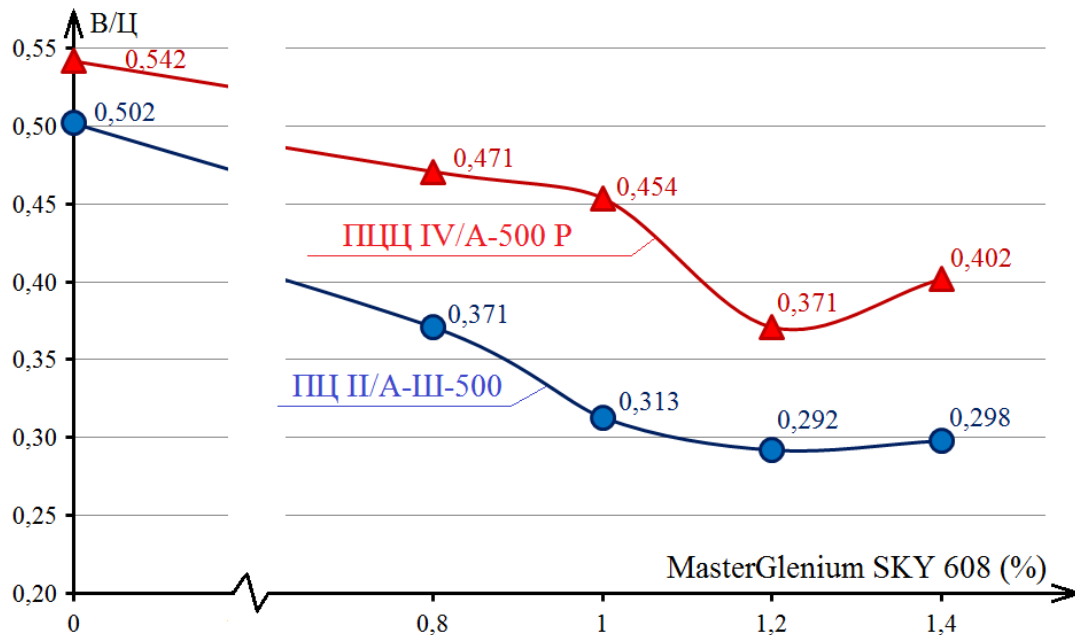


Рис. 3.4 Вплив кількості добавки MasterGlenium SKY 608 на В/Ц сумішей
рівної рухливості на різних типах цементу

Встановлено, що при кількості суперпластифікатора MasterGlenium SKY 608 1,2 % від маси цементу, забезпечується найбільший водоредукуючий ефект. При цьому за умови рівної витрати добавки В/Ц бетонних сумішей на основі пуццоланового портландцементу ПЦЦ IV/A-500 P було значно вище, ніж В/Ц сумішей рівної рухливості на основі портландцементу ПЦ II/A-III-500.

Середня густина досліджених бетонів становила від 2430 до 2510 кг/м³. Для кожної з 10 партій бетонів (6 кубів 10×10×10 см) проводилися випробування міцності на стиск у віці 3 і 28 діб. Характеристики міцності на стиск досліджених на даному етапі роботи бетонів наведені на у таблиці 3.4. За даними таблиці побудовані показані на рис. 3.5 графіки.

Таблиця 3.4

Міцність у віці 3х і 28 діб бетонів на різних типах цементів
з різною кількістю добавки суперпластифікатора MasterGlenium SKY 608

№	Тип цементу	Добавка MasterGlenium SKY 608, %	Міцність на стиск у віці 3х діб $f_{ck.cube.3}$ (МПа)	Міцність на стиск у віці 28 діб $f_{ck.cube}$ (МПа)
1	ПЦЦ IV/A-500 P	-	19,9	36,3
2		0,8	25,1	47,4
3		1,0	26,2	54,5
4		1,2	37,0	69,9
5		1,4	29,6	66,1
6	ПЦ II/A-III-500	-	29,3	51,3
7		0,8	45,4	64,5
8		1,0	49,5	69,8
9		1,2	64,1	85,6
10		1,4	53,8	78,8

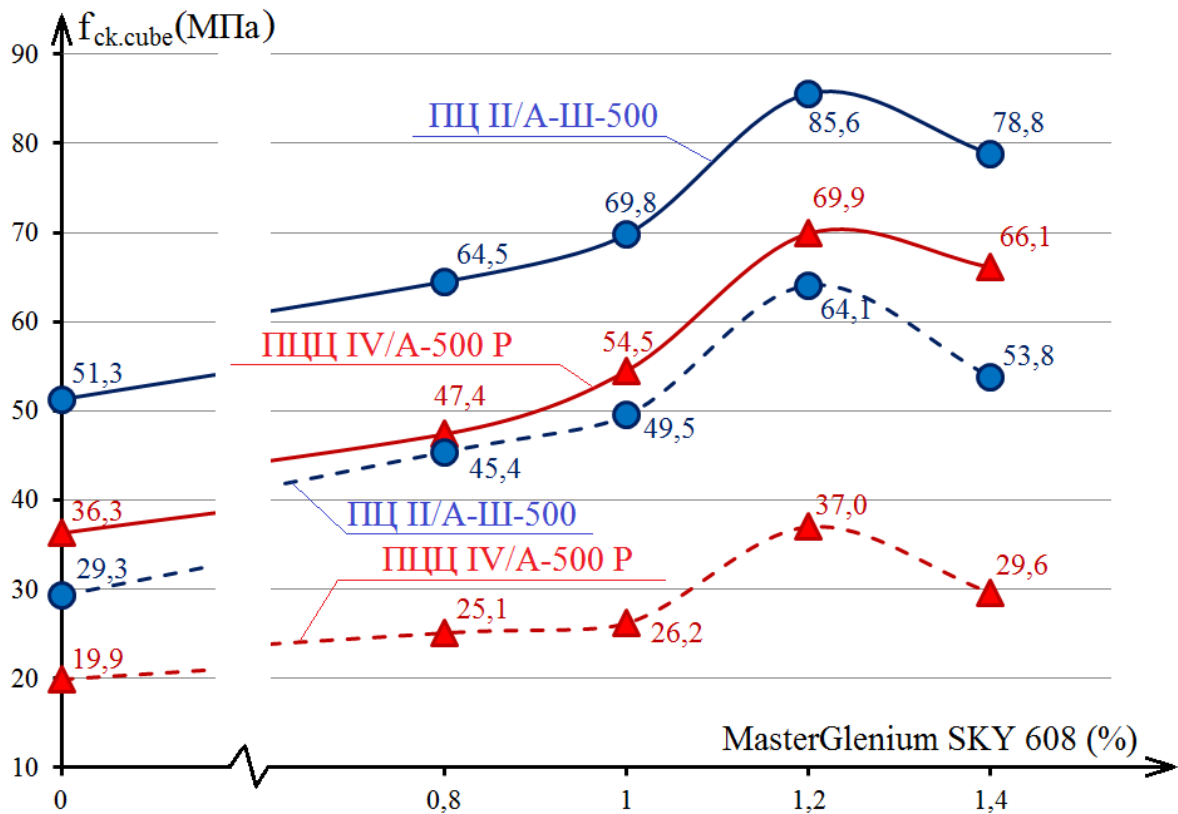


Рис. 3.5 Вплив кількості добавки MasterGlenium SKY 608 на міцність досліджених бетонів на різних типах цементів у віці 3 і 28 діб

Аналіз показаних на рис. 3.5 графіків дозволяє відзначити, що рання і марочна (проектна) міцність контрольного немодифікованого бетону на основі цементу ПЦ ІІ/А-Ш-500 ($f_{ck.cube.3} = 29,3$ МПа, $f_{ck.cube.28} = 51,3$ МПа) вище ранньої і марочної міцності ($f_{ck.cube.3} = 19,9$ МПа, $f_{ck.cube.28} = 36,3$ МПа) аналогічного бетону на основі пуццоланового цементу ПЦЦ ІV/А-500 Р. Даний ефект викликаний підвищеною водопотребою пуццоланового цементу і відповідно бетонних сумішей на його основі. Для модифікованих добавкою MasterGlenium SKY 608 складів (№ 2-5 і № 7-10) також простежується тенденція більшої міцності бетонів на основі цементу ПЦ ІІ/А-Ш-500.

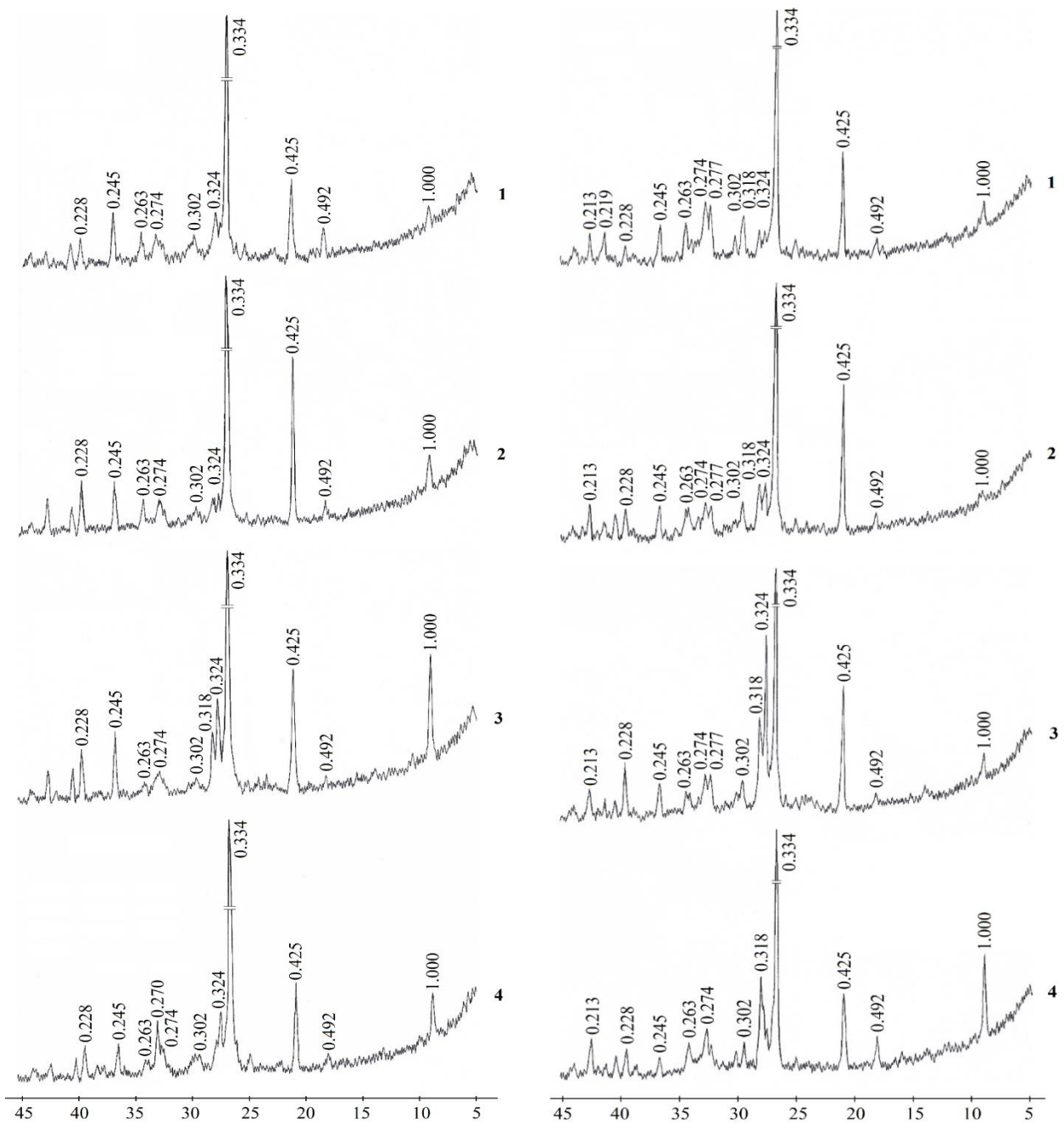
Введення добавки MasterGlenium SKY 608 в кількості 0,8% від маси цементу за рахунок зниження В/Ц підвищило міцність при стиску бетонів на обох типах цементу майже на 2 класи. При введенні 1% модифікатора міцність підвищилася ще на 1 клас, а при 1,2% – на 3 класи для бетонів на основі портландцементу ПЦЦ ІV/А-500 Р і на 2 класи з портландцементом ПЦ ІІ/А-Ш-

500. Підвищення кількості добавки до 1,4 % від маси цементу вже не раціонально, тому що при цьому підвищується В/Ц сумішей і відповідно знижується міцність досліджених бетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

Таким чином, раціональним для бетонів на обох видах цементу є кількість добавки 1,2 % від маси в'язучого, при якому досягнута максимальна міцність на стиск за рахунок мінімізації В/Ц. В цілому на основі портландцементу ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 був отриманий високоміцний бетон з міцністю 85,6 МПа, що відповідає класу не менше С50/60. На основі цементу ПЦЦ ІV/А-500 Р був отриманий бетон міцністю 64,1 МПа, що відповідає класу не менше С 40/50.

Важливо відзначити, що рання міцність на 3 добу модифікованих бетонів з оптимальною кількістю добавки MasterGlenium SKY 608 (1,2 % від маси цементу) на пуццолановому цементі ПЦЦ ІV/А-500 Р склала 52,9% марочної, а бетонів на основі портландцементу ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 – 74,9% від марочної. Тобто, за рахунок використання модифікованих бетонів необхідна міцність для більшості бетонів жорстких дорожніх і аеродромних покриттів досягається вже у віці 3-х діб, що важливо для ремонтних матеріалів, а також з точки зору здійснення необхідних подальших технологічних операцій при влаштуванні дорожнього покриття. Тобто, застосування бетонів на таких в'язучих при будівництві та ремонті жорстких дорожніх і аеродромних покриттів сприяє більш швидкому початку експлуатації.

В цілому з врахуванням описаних вище результатів досліджень і наявності на ринку півдня України в якості основного в'язучого для розробки високофункціональних складів для ремонту та влаштування жорстких покриттів був обраний портландцемент ПЦ ІІ/А-ІІІ-500, який відповідає вимогам [65] і може зокрема використовуватися для отримання швидкотвердіючих ремонтних бетонів (high-early strength concrete). Рання міцність бетону на основі даного цементу, яка визначалася у віці 3х діб, становила до 64,1 МПа.



(а)

(б)

Рис. 3.6. Дифрактограми цементно-піщаної матриці бетону: а - на основі ПЦЦ IV/A-500 P; б - на основі ПЦЦ IV/A-500 P

а) 1 - ПЦЦ IV/A-500 P і 1,4% полікарбоксилатної добавки; 2 - ПЦЦ IV/A-500 P і 1,2% полікарбоксилатної добавки; 3 - ПЦЦ IV/A-500 P і 1,0% полікарбоксилатної добавки; 4 - ПЦЦ IV/A-500 P і 0,8% полікарбоксилатної добавки;

б) 1 - ПЦ II/A-Ш-500 і 1,4% полікарбоксилатної добавки; 2 - ПЦ II/A-Ш-500 і 1,2% полікарбоксилатної добавки; 3 - ПЦ II/A-Ш-500 і 1,0% полікарбоксилатної добавки; 4 - ПЦ II/A-Ш-500 і 0,8% полікарбоксилатної добавки

Використання раціональної кількості добавки BASF MasterGlenium SKY 608 на основі ефірів полікарбоксилату дає можливість отримувати бетони високої ранньої та проектної міцності. Застосування таких бетонів для ремонту та влаштування жорстких покриттів доріг та аеродромів сприяє швидкому початку експлуатації руху. Раціональна кількість добавки MasterGlenium SKY 608 становить 1,2% від маси в'язучого для бетонів на обох типах цементу – ПЦ II/A-III-500 (CEM II/AS 42,5) та ПЦЦ IV/A-500 P (CEM IV/A (P) 42,5 R –SR).

Також на даному етапі роботи з використанням рентгенофазового аналізу була досліджена структура бетонів на різних типах цементу [223]. Було встановлено, що на дифрактограмах (рис. 3.6 а, б) зразків № 2-5 цементно-піщаної матриці бетону на основі портландцементу ПЦЦ IV/A-500 P та № 6-10 на основі ПЦ II/A-III-500 фіксуються лінії природного кварцу ($d/n = 0,424; 0,334; 0,245; 0,228$ нм) та незначні рефлекси портландиту ($d/n = 0,493; 0,263$ нм). Також проявляється лінія $d/n = 1000$ нм, що відповідає метастабільній фазі у цементно-піщаній матриці – натріймісткому гідросульфоалюмінату кальцію $4CaO \cdot 0,9Al_2O_3 \cdot 1,1SO_3 \cdot 0,5Na_2O \cdot 16H_2O$. (за Ларіоновим З. М.).

Важливо відзначити, що інтенсивність лінії $d/n=1000$ нм при високих дозуваннях добавки полікарбоксилату MasterGlenium SKY 608 (1,2% та 1,4% маси цементу) як для бетонів на основі ПЦЦ IV/A-500 P, так і для бетонів на основі ПЦ II/A-III-500 є меншою, ніж інтенсивність цієї лінії при менших дозуваннях добавки (0,8% і 1%). Це свідчить про позитивну роль полікарбоксилатної добавки при структуроутворенні.

Тобто рентгенофазовий аналіз показав позитивну роль полікарбоксилатної добавки при структуроутворенні бетону, яка проявляється в першу чергу завдяки зниженню В/Ц. При підвищенні дозування добавки MasterGlenium SKY 608 до 1,2..1,4 % інтенсивність ліній на дифрактограмах, що відповідають метастабільній гідратній фазі у цементно-піщаній матриці, зменшувалася для бетонів на обох типах цементів. Також це підтверджує, що, як сказано вище, раціональною для даних типів бетонів є дозування добавки MasterGlenium SKY 608 у кількості 1,2 % від маси цементу.

3.4 Вплив активної мінеральної добавки на властивості модифікованого бетону для влаштування і ремонту жорстких покриттів

Технологія бетонів знаходиться в постійному розвитку. Сьогодні практично не використовуються класичні трикомпонентні бетони. Прогресують технології бетонних сумішей з використанням суперпластифікаторів і активних мінеральних добавок, однією з яких є метакаолін [195, 196, 244-246]. Також рік від року все гострішою стає проблема забруднення навколишнього середовища при виробництві цементу [247], що призвело до використання в якості часткової заміни клінкеру продуктів, що мають пуцоланові властивості, зокрема метакаолін. Це дозволяє знизити витрати енергетичних ресурсів та викиди в атмосферу.

Метакаолін є продуктом випалення очищеної каолінітової глини при температурі 600-900°C. При нагріванні $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$ (каоліну) за рахунок випаровування зв'язаної води деформується кристалічна структура, утворюється негідратована реактивна форма, що складається з аморфного алюмосилікату – метакаоліну.

На даному (четвертому) етапі роботи досліджувалися властивості бетонів і бетонних сумішей, які були комплексно модифіковані полікарбоксилатною добавкою BASF MasterGlenium SKY 608 і високоактивним метакаоліном.

Відомо, що характеристики бетону визначаються його міцністю і властивостями, які визначають його довговічність в типових для нього умовах експлуатації. З появою суперпластифікаторів різного типу і більш повним розкриттям реакційної здатності високоактивного метакаоліну з'явилася можливість отримувати високофункціональні бетони [248, 249], що відрізняються високою ранньою (від 30 МПа на 2 добу) і марочною міцністю від 60 МПа. Висока морозостійкість (для дорожніх бетонів F200 і вище) і низька стиранисть забезпечують високу довговічність матеріалу, що потенційно дозволяє використовувати його для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

Україна займає одне з провідних місць в світі по промисловим запасам каолінів, обсяг яких перевищує 300 млн. т. [249]. Метакаолін як пуццоланову добавку для бетонних сумішей вперше використали в Бразилії (1962 р.) для будівництва дамб [250]. Крім того, виробництво метакаоліну в порівнянні з портландцементом вимагає набагато меншої температури прожарювання, в результаті чого виділяється менше CO_2 . Згідно [251] на кожен вироблену тону цементу викидається в атмосферу 0,82..1 тону CO_2 .

Залежно від типу і дозування використовуваного в бетоні цементу прийнята (оптимальна) кількість його заміни на метакаолін становить до 20% [249, 252, 253]. Пуццоланові властивості метакаоліну покращують фізико-механічні властивості бетону за рахунок утворення додаткового гідросилікату кальцію (C-H-S) в результаті взаємодії продуктів гідратації цементу ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) з мінеральним наповнювачем, які мають меншу питому поверхню на відміну від цементу. Необхідно відзначити, що В/Ц бетонних сумішей з метакаоліном зазвичай зростає зі збільшенням кількості активної мінеральної добавки. Виникає необхідність застосування водоредукуючих добавок-суперпластифікаторів для забезпечення легкоукладальності суміші при меншому В/Ц.

На даному четвертому етапі роботи на основі оптимального складу, отриманого на попередньому етапі роботи високоміцного бетону для влаштування і ремонту жорстких покриттів, що описано вище у п.3.3 [224], було проведене додаткове модифікування сумішей метакаоліном методом часткової заміни цементу. Замінювалося 15 і 30 $\text{кг}/\text{м}^3$ в'язучого, відповідно 3,75% і 7,5% від маси цементу.

Було виготовлено 3 партії зразків бетону, в кожній партії виготовлялося 18 кубів розміром $10 \times 10 \times 10$ см і 9 призм розміром $40 \times 10 \times 10$ см. Склади досліджених на даному етапі бетонів і В/Ц сумішей показані в таблиці 3.5. Марка бетонних сумішей за легкоукладальністю S2 (ОК 6 ...7 см), що співпадає з рухомістю сумішей, досліджених на попередніх етапах роботи і відповідає

вимогам щодо легкоукладальності складів для влаштування і ремонту жорстких дорожніх і аеродромних одягів.

Таблиця 3.5

Склади досліджених бетонів і В/Ц бетонних сумішей
(марка за легкоукладальністю S2)

№	Цемент, кг/м ³	Щебінь, кг/м ³	Пісок, кг/м ³	Метакаолін, кг/м ³	Добавка MasterGlenium SKY 608, %	Вода, л/м ³	В/Ц
1	400	1195	830	0	1,2	115	0,288
2	385		825	15		124	0,322
3	370		820	30		126	0,341

Середня густина досліджених бетонів становила від 2480 до 2580 кг/м³ і досягалася за рахунок оптимального проектування бетонних складів. Характеристики міцності на стиск і на розтяг при згині визначалися для кожної партії у віці 2 і 28 діб. Отримані дані відображені на діаграмах, наведених на рис.3.7 і рис.3.8.

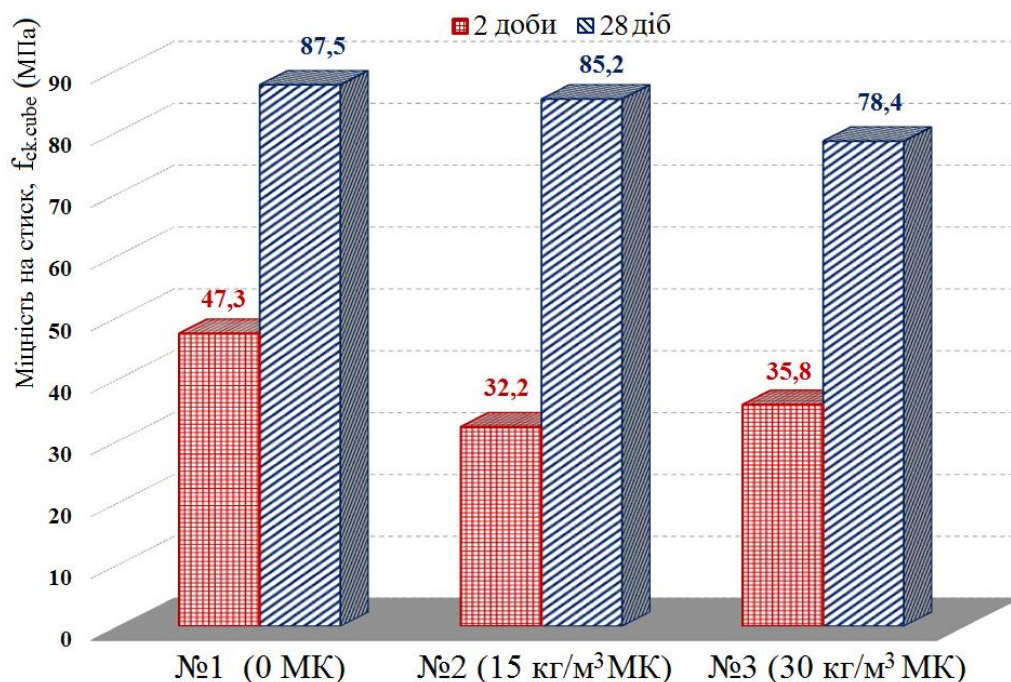


Рис. 3.7 Міцність на стиск досліджених бетонів у віці 2 і 28 діб (МК – метакаолін)

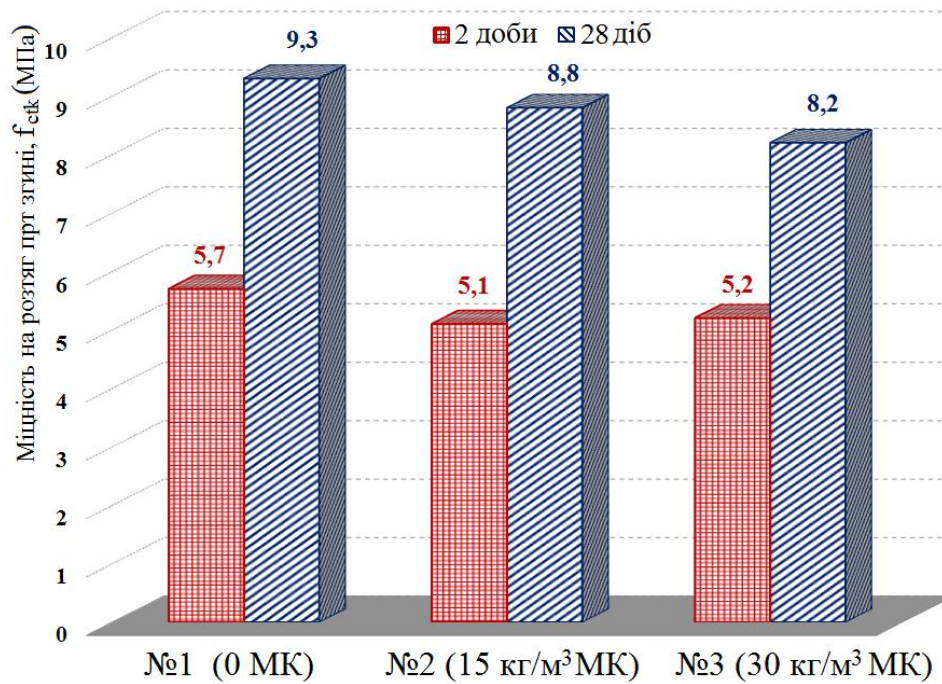


Рис. 3.8 Міцність на розтяг при згині досліджених бетонів у віці 2 і 28 діб (МК – метакаолін)

Аналіз наведених на рис. 3.7 і рис.3.8 даних показує, що рання і марочна міцність на стиск і розтяг при згині модифікованого бетону без додавання метакаоліну ($f_{ck.cube.2} = 47,3$ МПа, $f_{ck.cube} = 87,5$ МПа, $f_{c.tf.2} = 5,7$ МПа, $f_{c.tf} = 9,3$ МПа) дещо вище аналогічних показників міцності бетону з частковою заміною цементу на метакаолін. Це викликано насамперед підвищенням водопотреби бетонних сумішей через більшу дисперсність метакаоліну у порівнянні з цементом. Необхідно відзначити, що в 2х добовому віці міцність на стиск і розтяг при згині складу № 3 (30 кг цементу замінено на метакаолін) при більшому В/Ц на 5,9 % була вище міцності складу № 2 (15 кг цементу замінено на метакаолін). Це пояснюється збільшенням кількості новоутворень (С-Н-S) в ранні терміни тужавіння зі збільшенням кількості метакаоліну [256]. Ймовірно, така тенденція може зберігатися при подальшому збільшенні кількості метакаоліну, але підвищення В/Ц суміші в цьому випадку може не компенсуватися введенням суперпластифікатора.

На основі портландцементу ПЦ II/A-III-500 з кількістю добавки BASF MasterGlenium SKY 608 1,2% від маси цементу був отриманий високоміцний

бетон з міцністю 87,5 МПа (п.3.3), що приблизно відповідає класу С50/60. Заміна 15 кг цементу на метакаолін дозволила отримати бетон того ж класу С50/60 з міцністю 85,2 МПа, а при заміні 30 кг цементу був отриманий бетон класу С45/55 з міцністю 78,4 МПа.

Рання міцність є важливим показником якості бетонів для влаштування і ремонту жорстких покриттів доріг і аеродромів. Міцність на стиск досліджених модифікованих бетонів у віці 2-х діб склала 54%, 38% і 46% від марочної для складів №1, №2 і №3 відповідно. Міцність на розтяг при згині в 2х добовому віці для даних складів становила 61%, 58% і 63% від міцності на 28 добу. Характеристики міцності отриманих бетонів дозволяють використовувати їх для влаштування і ремонту дорожніх одягів, тому що основним показником механічних властивостей для таких матеріалів є їх рання міцність на розтяг при згині, яка склала більше 5 МПа на 2 добу твердіння для всіх досліджуваних складів.

Морозостійкість досліджуваних бетонів визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 [211], 3й прискорений метод. На рис.3.9 показана втрата міцності досліджуваних бетонів в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання (заморожування у солоній воді при температурі до -50°C).

Отримані значення для всіх складів відповідали марці за морозостійкістю F200 для дорожніх бетонів, що еквівалентно марці F600 при визначені за методикою для інших видів бетонів (конструкційних). Висока морозостійкість складів з метакаоліном може пояснюватися тим, що зі збільшенням його кількості утворюється більша кількість новоутворень (С-Н-S) [249], які зменшують середній розмір пор і нівелюють підвищення В/Ц суміші.

Як зазначалося вище, зносостійкість дорожнього покриття є невід'ємною характеристикою його довговічності. Найбільш важливими факторами, що впливають на зносостійкість бетону, служать його міцність, природа і кількість заповнювача, яка визначається через відношення цемент/заповнювач, а також його максимальний розмір [254, 255]. Визначення стираності досліджених бетонів проводилося за ДСТУ Б В.2.7-212:2009 [210]. Результати показали

достатньо високу зносостійкість (низьку стиранисть) всіх досліджених бетонів – 0,30...0,31 г/см², що забезпечує їх необхідну придатність в умовах впливу автомобільного транспорту.

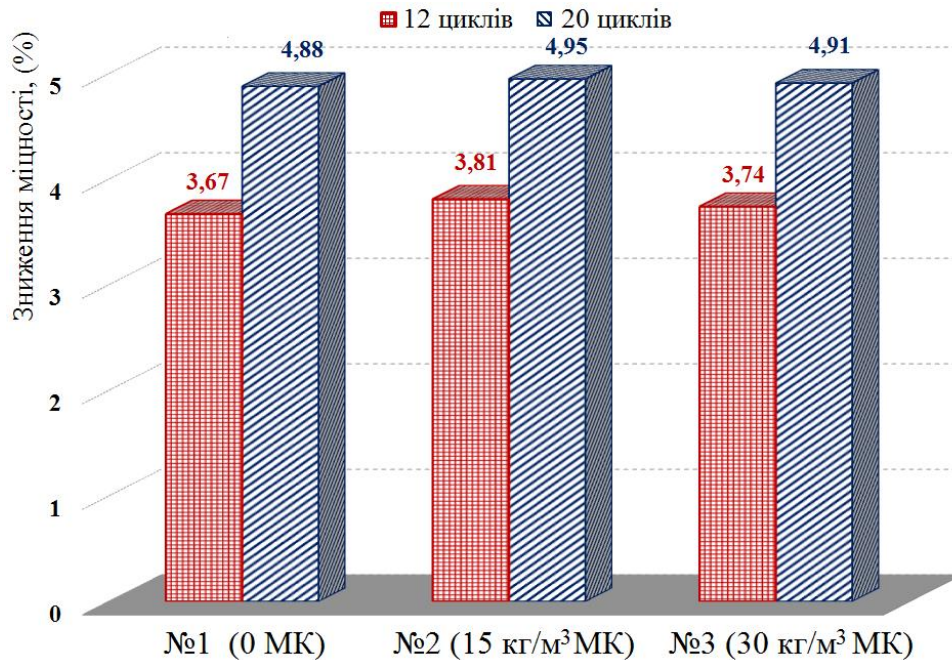


Рис. 3.9 Втрата міцності бетонів після 12 і 20 циклів заморожування-відтавання згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96, 3й прискорений метод (МК – метакаолін)

При ремонті жорстких покриттів доріг, а також меншою мірою при їх влаштуванні, важливим показником якості бетону є його усадка. При ремонті усадка багато в чому визначає спільну роботу нового і старого бетону, при влаштуванні – стійкість до утворення тріщин. Деформації свіжеукладеного бетону можуть бути викликані наступними причинами [256-258]: пластична усадка, хімічна усадка, яка є невід'ємною частиною аутогенної усадки і може не враховуватися на практиці, вологісна усадка, карбонізаційна усадка, що розвивається з плином тривалого періоду часу і складає незначну величину, якою можна знехтувати. Найбільш вивченою є вологісна усадка (усадка при висиханні), що викликає основні усадочні деформації цементного каменю і залежить від типу і витрати цементу, його питомої поверхні та В/Ц відношення, яке визначає вологість цементного каменю [259, 260]. Згідно з дослідженнями

[255] підвищення кількості метаксаоліну знижує усадку з плином часу при однаковому В/Ц сумішей і рівній рухливості за рахунок новоутворень С-S-H, що підвищують міцність бетонів і утворюють більш щільний скелет з меншою кількістю пор. Але фактично метаксаолін, як показано вище, викликає необхідність підвищення В/Ц.

У нашому дослідженні проводилися вимірювання загальної усадки, що складається з аутогенної і вологісної усадки для сумішей фактично з різними В/Ц. Вимірювання усадочних деформацій проводилося на призмах розміром 40×10×10 см згідно ДСТУ Б.В.2.7-216:2009 [213]. Вимірювання починалися через 24 години після формування і безпосередньо після розпалубки зразків. Визначення деформацій проводилося за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм через 3 години, 6 годин, 1, 2, 3 і 7 діб. За результатами вимірювань були побудовані відповідні графіки, представлені на рис.3.10.

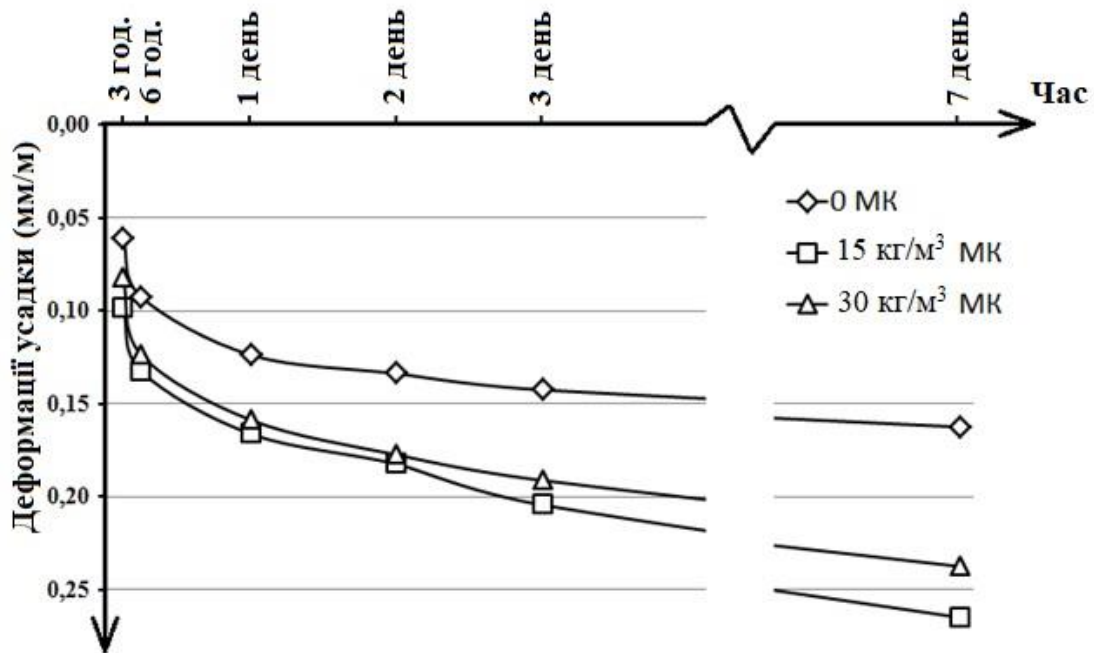


Рис. 3.10 Загальна усадка досліджених бетонів на ранніх термінах твердіння

Аналіз графіків показує, що через додаткову водопотребу метаксаоліну і відповідно більшому В/Ц суміші усадка бетонів складів №2 і №3 є більшою,

ніж усадка бетону без активної мінеральної добавки. Проте завдяки використанню ефективного суперпластифікатора MasterGlenium SKY 608 та раціонального підбору заповнювачів усадка бетонів для влаштування і ремонту жорстких аеродромних і дорожніх покриттів є задовільною і при використанні метаксаоліну.

Таким чином, заміна частини цементу метаксаоліном спричиняє необхідність підвищити В/Ц бетонної суміші, однак це несуттєво позначається на міцності на стиск і на розтяг при згині модифікованих полікарбосилатною добавкою BASF MasterGlenium SKY 608 бетонів. Контрольний бетон і бетон з метаксаоліном в кількості 15 кг/м^3 відповідають класу C50/60. При заміні 30 кг цементу на метаксаолін отримано бетон класу C45/55. Усадка бетонів з метаксаоліном, введеним на заміну частини цементу, не перевищує $0,28 \text{ мм/м}$, а всі досліджені бетони мали високу морозостійкість (F200 для дорожніх бетонів) і низьку стиранисть – $0,30\text{-}0,31 \text{ г/см}^2$. Такі фізико-механічні показники забезпечують достатньо високу довговічність бетонів жорстких покриттів доріг в типових умовах експлуатації.

Проте використання метаксаоліну не викликало покращення фізико-механічних характеристик бетонів для влаштування і ремонту жорстких покриттів, а усадка матеріалу навіть зростає. Відповідно з врахуванням вартості метаксаоліну на ринку України, яка є фактично у 6..10 разів вище вартості цементу, не можна визнати раціональним застосування цього додаткового компоненту в бетонах для влаштування і ремонту жорстких дорожніх та аеродромних покриттів. У подальших дослідженнях в рамках цієї роботи активна мінеральна добавка метаксаолін не використовується. Але слід зауважити, що при підсиленні в нашій країні екологічних вимог щодо вуглецевого сліду, а також у разі значного подорожчання енергоресурсів, які витрачаються для виробництва клінкеру, використання пуцоланових активних мінеральних добавок в бетонах дорожніх покриттів буде більш доцільним.

Висновки за 3-м розділом

1. Порівняно властивості не модифікованих бетонів класу С30/35 на чотирьох типах цементу: ССПЦ400-Д0, ПЦ-ІІ/А-ІІ-500 Р-Н, ПЦЦ ІV/А-500 Р і ПЦ ІІ/А-ІІІ-500. Встановлено, що бетони на основі ПЦ-ІІ/А-ІІ-500 Р-Н виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент» і ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 виробництва ПрАТ «Дікергофф Цемент Україна», забезпечують кращу ранню міцність, що важливо для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів, зокрема для ремонтних. З врахування ситуації на ринку України у якості основного в'язучого для бетонів жорстких покриттів обрано портландцемент ПЦ ІІ/А-ІІІ-500.

2. Попередні дослідження показали обмежену ефективність поліпропіленової фібри в бетонах для влаштування і ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

3. Досліджено вплив суперпластифікатора полікарбоксилатного типу на міцність і структуру ремонтних бетонів на цементах ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 і ПЦЦ ІV/А-500. Встановлено, що для бетонів на обох типах цементу раціональною є кількість добавки BASF MasterGlenium SKY 608 1,2% від маси в'язучого. На основі портландцементу ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 отримано бетон з марочною міцністю 85,6 МПа та міцністю у віці 3х діб 64,1 МПа. На основі цементу ПЦЦ ІV/А-500 Р отримано бетон міцністю 64,1 МПа з міцністю у віці 3х діб 37,0 МПа.

4. Рентгенофазовий аналіз показав позитивну роль полікарбоксилатної добавки при структуроутворенні бетону. При підвищенні дозування добавки MasterGlenium SKY 608 до 1,2..1,4% інтенсивність ліній на дифрактограмах, що відповідають метастабільній гідратній фазі у цементно-піщаній матриці, зменшувалася для бетонів як на цементі ПЦ ІІ/А-ІІІ-500, так і на цементі ПЦЦ ІV/А-500 Р, що вказує на раціонально підбрану кількість пластифікатору.

5. Досліджено вплив активної мінеральної добавки метакаоліну на властивості модифікованого добавкою MasterGlenium SKY 608 бетону для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

Встановлено, що заміна до 30 кг/м^3 цементу метакаоліном не викликає покращення фізико-механічних характеристик бетонів: морозостійкість і зносостійкість бетону не змінюється, міцність несуттєво знижується. Усадка бетонів з метакаоліном завдяки підвищенню В/Ц суміші зростає. З врахуванням вартості метакаоліну на ринку України не можна визнати раціональним застосування цього додаткового компонента в бетонах жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

6. Результати викладених у даному розділі досліджень були опубліковані у роботах [194, 223, 224, 241].

РОЗДІЛ 4

ВЛАСТИВОСТІ ФІБРОБЕТОНІВ ДЛЯ РЕМОНТУ І ВЛАШТУВАННЯ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ І АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ

Як зазначалося вище, цементобетонні покриття все ширше використовуються у будівництві автомобільних доріг та аеродромних покриттів [88]. Україна в останні роки також нарощує темпи будівництва автомагістралей із застосуванням дорожніх одягів жорсткого типу [1]. Крім того цементобетони використовуються при влаштуванні нових злітно-посадкових смуг у фактично всіх аеропортах України. Мінімальна проектна міцність на розтяг при згині для жорстких дорожніх покриттів відповідно до [22] знаходиться в діапазоні 4..5 МПа, а мінімальний клас бетону для аеродромних покриттів – С32/40 [261]. Проте необхідно враховувати щорічне збільшення транспортних навантажень, граничні значення яких часто перевищують проектні вимоги ще на протязі періоду між капітальним ремонтом. В таких умовах ефективним матеріалом для дорожніх і аеродромних покриттів є фібробетон, який має високу міцність на розтяг при згині та стійкість до динамічних навантажень [262-264].

Підтримання належного експлуатаційного стану жорстких автомобільних та аеродромних покриттів та безпеки руху передбачає використання при їх влаштуванні та ремонті бетонів з високою міцністю, зокрема ранньою, а також довговічністю. Відомо, що одними з найбільш ефективних матеріалів для дорожніх покриттів є дисперсно-армовані бетони [26, 84]. Для поточного і капітального ремонту (при використанні методу глибинного ремонту), а також при реконструкції жорстких покриттів необхідно передбачити спеціальні технологічні прийоми із застосуванням швидкотвердіючих бетонних композицій, отже завдання їх розробки також є актуальним.

4.1 Вплив складу на В/Ц бетонних сумішей рівної рухомості

Як було вказано вище (п.2.3), на даному п'ятому етапі роботи досліджувалися властивості фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів. За оптимальним 2-х факторним планом проводився 2-факторний експеримент, в якому варіювалися такі фактори:

X_1 – кількість добавки прискорювача твердіння Sika Rapid 3, від 0 до 2,4 % від маси цементу (від 0 до 9,6 кг/м³);

X_2 – кількість сталеві анкерної фібри діаметром 1 мм і довжиною 50 мм, від 0 до 100 кг/м³.

Варіювання саме таких факторів складу у експериментальних дослідженнях обґрунтовується наступними обставинами.

Використання прискорювача твердіння (фактор X_1) дозволяє суттєво підвищити ранню міцність бетонів і фібробетонів для влаштування і ремонту жорстких дорожніх та аеродромних покриттів. При цьому важливо виявити раціональну кількість даного модифікатора з врахуванням його впливу на міцність матеріалу у марочному (проектному) віці, а також на показники якості, що визначають довговічність бетонів дорожніх і аеродромних покриттів.

Дисперсне армування сталеві анкерною фіброю (фактор X_2) як показано вище є ефективним методом покращення широкого спектру фізико-механічних показників бетонів для влаштування і ремонту дорожніх та аеродромних покриттів. Необхідно виявити раціональну кількість фібри для даного типу бетону при різних вимогах щодо матеріалу для ремонту або влаштування покриттів, зокрема вимог до ранньої міцності, та з врахуванням економічної складової.

План експерименту та склади досліджених у 9-ти експериментальних точках бетонів та фібробетонів наведені у таблиці 4.1.

План експерименту та склади досліджених на 5-му етапі роботи
бетонів і фібробетонів

№ складу	X ₁ , прискорювач твердіння	X ₂ , фібра	Склад бетонної суміші						
			Цемент, кг/м ³ ,	Пісок, кг/м ³ ,	Щебінь (л/м ³),	Добавка, кг/м ³	Прискорювач, кг/м ³	Фібра, кг/м ³	Вода, л/м ³
1	-1	-1	400	830	1190	4,8	0	0	127
2	0	-1		828			4,8	0	126
3	+1	-1		825			9,6	0	123
4	-1	0		788	1180		0	50	133
5	0	0		786			4,8	50	131
6	+1	0		782			9,6	50	130
7	-1	+1		752	1170		0	100	138
8	0	+1		750			4,8	100	135
9	+1	+1		745			9,6	100	132

Суміші всіх досліджених в експериментах бетонів і фібробетонів для глибинного ремонту (full-depth repair) та влаштування жорстких дорожніх покриттів мали рівну рухомість S2. При цьому фактично ОК сумішей складала від 6 до 8 см, що досягалося підбором кількості води у складі. Таке значення рухомості використовувалося на всіх етапах роботи і було обрано за результатами проведеного аналізу нормативних документів і технічної літератури [58, 62, 64, 67, 76, 79, 83, 219] як найбільш прийняте для бетонних сумішей, що використовуються для ремонту та влаштування жорстких дорожніх покриттів. Відповідно водопотреба і В/Ц бетонних сумішей залежали

від їх складу. В/Ц досліджених сумішей у 9-ти точках плану експерименту наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

В/Ц досліджених бетонних сумішей

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
В/Ц суміші	0,318	0,316	0,307	0,332	0,328	0,325	0,344	0,337	0,331

За наведеними у таблиці 4.2 даними була побудована адекватна (зі всіма значимими коефіцієнтами) експериментально-статистична (ЕС) модель [214, 215] впливу факторів складу на В/Ц бетонних сумішей рівної рухливості бетонів і фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх покриттів:

$$\begin{aligned} \text{В/Ц} = & 0,328 - 0,005x_1 \pm 0x_1^2 \quad \pm 0x_1x_2 \\ & + 0,012x_2 - 0,003x_2^2 . \end{aligned} \quad (4.1)$$

Поле властивостей даної ЕС-моделі (4.1) показує мінімальне значення [215] $\text{В/Ц}_{\min} = 0,309$ у точці з координатами $x_1 = 1$, $x_2 = -1$, тобто для складу при максимальній кількості прискорювача твердіння та без фібри. Максимальне $\text{В/Ц}_{\max} = 0,343$ спостерігається для складу у точці з протилежними координатами: $x_1 = -1$, $x_2 = 1$, тобто для бетонів без прискорювача твердіння та при використанні максимальної кількості фібри.

За ЕС-моделлю (4.1) були побудовані однофакторні діаграми, які відображають вплив варійованих факторів на В/Ц сумішей рівної рухливості в зонах екстремумів, тобто проходять через максимальне (червоні лінії) і мінімальне (сині лінії) значення показника [214], та які показані на рис.4.1. При побудові діаграм рівень не відображеного на кожній з них фактора фіксувався

на значенні, що забезпечувало відповідно максимальне і мінімальне значення В/Ц суміші.

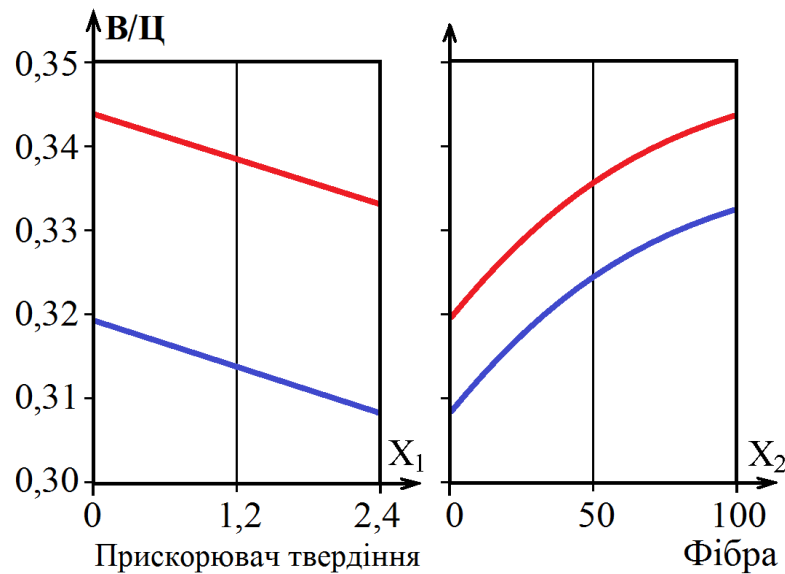


Рис.4.1 Вплив варійованих факторів складу на В/Ц бетонних сумішей рівної рухомості в зонах екстремумів

Аналіз наведених на рис.4.1 діаграм показує, що кількість прискорювача твердіння Sika Rapid 3 не суттєво впливає на В/Ц сумішей рівної рухомості. При цьому за рахунок введення даного модифікатору В/Ц неістотно, на величину до 3..4%, знижується. Це пояснюється тим, що фактично прискорювач являє собою рідину, яка при перемішуванні суміші здатна виконувати функцію, аналогічну воді. Кількість сталеві анкерної фібри досить суттєво впливає на В/Ц. Використання дисперсної арматури вимагає підвищення В/Ц для збереження необхідної рухомості суміші.

Для аналізу сумісного впливу варійованих факторів на В/Ц сумішей за ЕС-моделлю (4.1) була побудована діаграма у вигляді поверхні відгуку, яка наведена на рис.4.2.

Аналіз діаграми на рис.4.2 показує, що навіть при максимальному дозуванні фібри (100 кг/м³) В/Ц сумішей знаходиться у діапазоні 0,332..0,344, тобто є невисоким, що потенційно забезпечує необхідну якість композиту. Кількість фібри нелінійно впливає на водопотребу суміші і при введенні

дисперсної арматури у кількості 50 кг/м^3 В/Ц зростає відчутніше, ніж при підвищенні дозування фібри з 50 до 100 кг/м^3 .

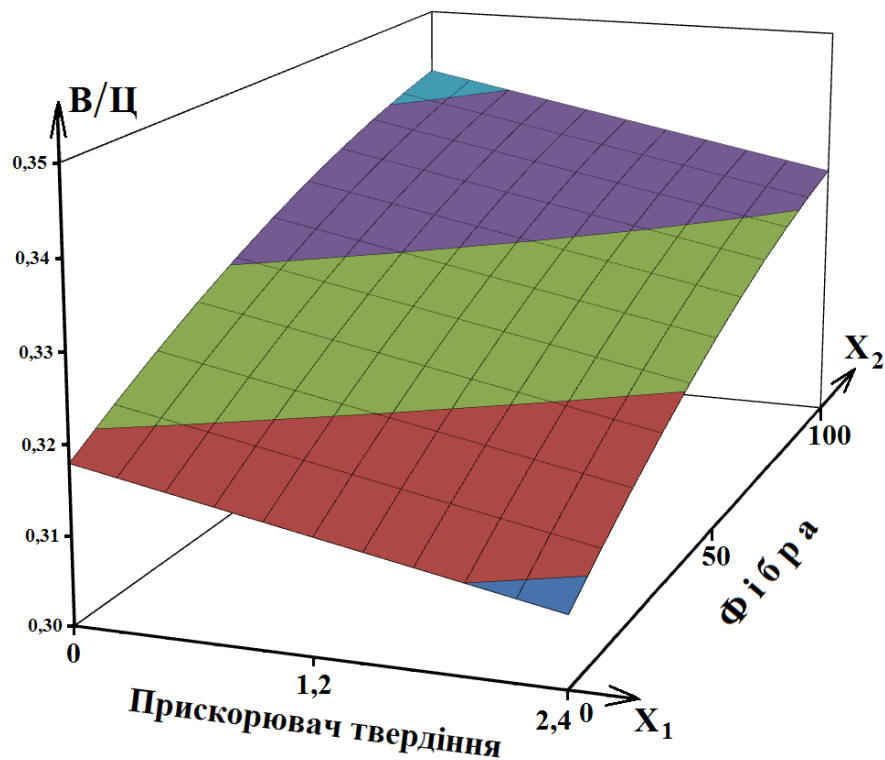


Рис.4.2 Вплив варійованих факторів складу на В/Ц бетонних сумішей рівної рухомості

В цілому за рахунок використання ефективного суперпластифікатора полікарбоксилатного типу MasterGlenium SKY 608 В/Ц всіх досліджених бетонних сумішей знаходилося в межах від 0,309 до 0,343, що дозволяє забезпечити високі фізико-механічні показники і довговічність бетонів і фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

4.2 Вплив кількості прискорювача твердіння і фібри на міцність бетонів і фібробетонів в різному віці

Для матеріалів дорожніх покриттів, насамперед для ремонтних, важливим показником якості є міцність в ранньому віці, що відзначалося вище. Для

жорстких дорожніх і аеродромних покриттів їх несуча здатність в значній мірі залежить саме від міцності матеріалу на розтяг при згині. Відповідно у досліджених на даному (п'ятому) етапі роботи бетонів і фібробетонів міцність на стиск і на розтяг при згині визначалася у віці 2-х і 28-ми діб. Отримані дані наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Міцність на стиск і на розтяг при згині
досліджених бетонів і фібробетонів у віці 2-х і 28-ми діб

№ складу	X ₁ , прискорювач твердіння	X ₂ , фібра	Міцність на стиск (МПа)		Міцність на розтяг при згині (МПа)	
			У віці 2-х діб f _{ck.cube2}	У віці 28-ми діб f _{ck.cube}	У віці 2-х діб f _{ctk2}	У віці 28-ми діб f _{ctk}
1	-1	-1	46,5	85,5	5,6	9,0
2	0	-1	51,8	76,2	5,8	7,2
3	+1	-1	56,4	72,8	6,0	6,9
4	-1	0	49,2	90,7	8,2	16,1
5	0	0	53,7	85,3	8,4	15,5
6	+1	0	59,1	83,1	8,7	14,9
7	-1	+1	52,6	92,5	8,6	16,8
8	0	+1	55,9	87,1	8,9	15,7
9	+1	+1	61,5	84,7	9,2	15,2

За даними, наведеними у таблиці 4.3, була побудована адекватна ЕС-модель впливу факторів складу на міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів у віці 2-х діб:

$$f_{ck.cube.2} \text{ (МПа)} = 53,80 + 4,78x_1 + 0,42x_1^2 - 0,25x_1x_2 + 2,55x_2 \pm 0x_2^2 . \quad (4.2)$$

Для даної ЕС-моделі поле властивостей має мінімальне значення $f_{ck.cube2.min} = 46,63$ МПа у точці з координатами $x_1 = x_2 = -1$, тобто для складу без прискорювача твердіння та фібри, максимальне значення $f_{ck.cube2.max} = 61,30$ МПа досягається у точці з координатами $x_1 = x_2 = 1$, тобто для складу з максимальним вмістом прискорювача твердіння та фібри.

За ЕС-моделлю (4.2) були побудовані показані на рис.4.3 однофакторні діаграми, що відображають вплив двох варійованих факторів на міцність на стиск у віці 2-х діб досліджених бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів.

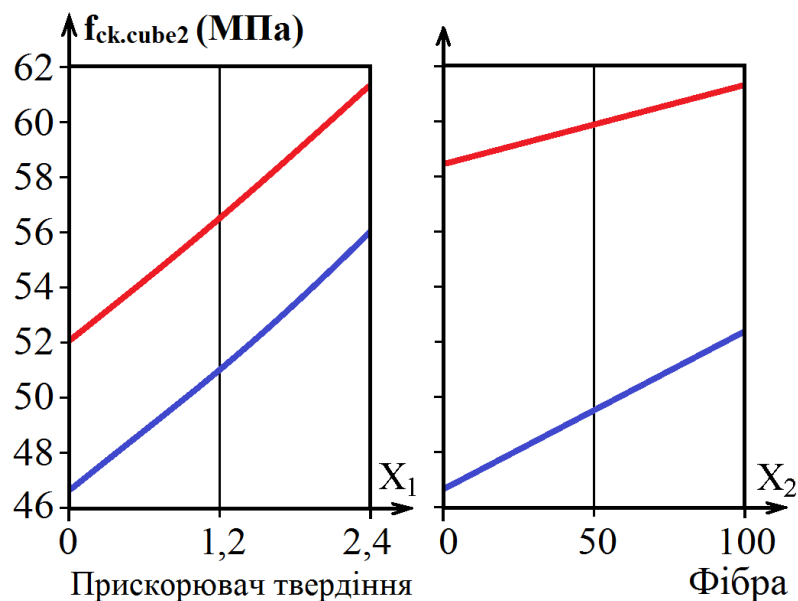


Рис.4.3 Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 2-х діб в зонах екстремумів

Аналіз наведених на рис.4.3 діаграм дозволяє зробити висновок, що на ранню міцність бетонів і фібробетонів для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів найбільш суттєво впливає кількість прискорювача твердіння. При використанні добавки Sika Rapid 3 у кількості 2,4% від маси цементу значення $f_{ck.cube.2}$ зростає більше, ніж на 9 МПа. Це в цілому очікуваний ефект, безпосередньо для досягнення якого і застосовувався даний модифікатор. При цьому фібра також позитивно впливає на ранню міцність матеріалу.

Сумісний вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 2-х діб відображено на діаграмі на рис.4.4, яка також побудована за ЕС-моделлю (4.2).

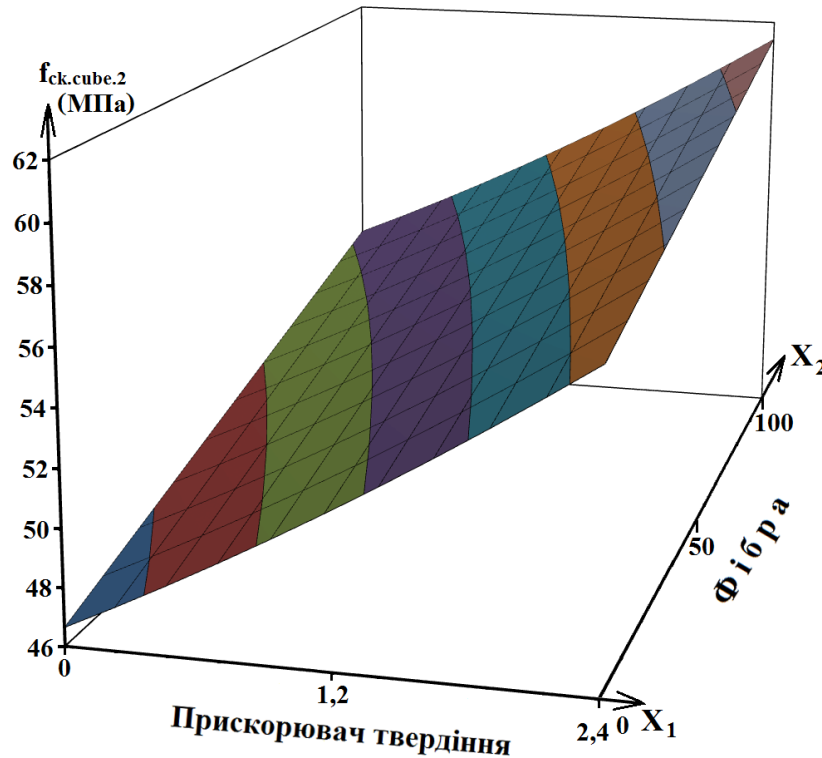


Рис.4.4 Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 2-х діб

Як видно з показаної на рис.4.4 діаграми, при використанні максимальної кількості прискорювача твердіння незалежно від кількості фібри вже після 2-х діб твердіння бетон має міцність не нижче 55 МПа, що практично для всіх типів автодоріг та аеродромів дозволяє починати експлуатацію ділянки, що влаштована або відремонтована. Тобто вже у ранньому віці міцність бетону фактично відповідає класу С32/40. При цьому фібробетони з кількістю фібри у складі 50 кг/м³ і вище мають міцність не менше 55 МПа вже при кількості прискорювача твердіння від 1,4%. При використанні максимальної кількості дисперсної арматури і добавки Sika Rapid 3 рання міцність фібробетонів складає не менше 60 МПа, тобто вже у віці 2-х діб забезпечується міцність, яка відповідає класу бетону С35/45.

Таким чином, досліджені модифіковані фібробетони при використанні раціональної кількості дисперсної арматури і хімічних добавок (модифікаторів) за своєю ранньою міцністю є ефективними матеріалами для жорстких дорожніх і аеродромних покриттів. В першу чергу рання міцність важлива для ремонтних матеріалів.

У проектних вимогах до бетонів будь яких конструкцій, включаючи покриття автомобільних доріг і аеродромів, одним з основних показників якості завжди є міцність у проектному віці, тобто після 28-ми діб твердіння.

ЕС-модель, що відображає вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб, та яка побудована за даними таблиці 4.3, має вигляд:

$$f_{ck.cube} \text{ (МПа)} = 85,0 - 4,68x_1 + 2,02x_1^2 + 1,23x_1x_2 + 4,97x_2 - 3,23x_2^2 . \quad (4.3)$$

Поле властивостей даної ЕС-моделі показує максимальне значення $f_{ck.cube.max} = 92,8$ МПа у точці з координатами $x_1 = 1$, $x_2 = -1$, мінімальне $f_{ck.cube.min} = 72,9$ МПа у точці з координатами $x_1 = -1$, $x_2 = 0,58$. За ЕС-моделлю (4.3) були побудовані наведені на рис.4.5 однофакторні діаграми, які відображають вплив варійованих факторів на міцність на стиск у віці 28 діб досліджених бетонів і фібробетонів в зонах екстремумів.

Як видно з показаних на рис.4.5 діаграм, у проектному віці бетони і фібробетони, до складу яких входив прискорювач твердіння, мають меншу міцність на стиск, ніж бетони аналогічних складів без добавки прискорювача Sika Rapid 3. При використанні середньої кількості прискорювача (1,2% від маси цементу) міцність на стиск досліджених бетонів знижується в середньому на 6 МПа, при використанні максимальної кількості модифікатору, 2,4% від маси цементу – на 9 МПа. Але у проектному віці позитивний вплив дисперсного армування сталевую фіброю на міцність на стиск є більш відчутним, ніж у віці 2-х діб. Так при використанні фібри у кількості 50 кг/м³

міцність на стиск бетонів зростає в середньому на 8 МПа, а при використанні максимальної кількості фібри, тобто 100 кг/м^3 , міцність зростає в середньому на 10 МПа.

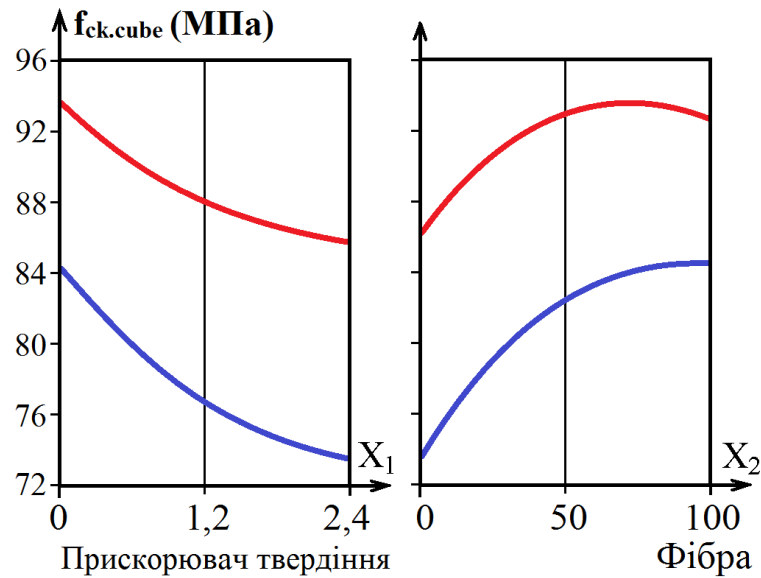


Рис.4.5 Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб в зонах екстремумів

Для аналізу сумісного впливу варійованих факторів на міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб за ЕС-моделлю (4.3) була побудована діаграма у вигляді поверхні відгуку, яка наведена на рис.4.6 і аналогічна за типом діаграмам на рис.4.2 і рис.4.4.

Аналіз діаграми на рис.4.6 показує, що як відмічалось вище, використання прискорювача твердіння, який дозволяє відчутно підвищити ранню міцність бетонів для ремонту дорожніх покриттів, негативно відображається на міцності композиту в проектному віці. Це відомий і досить широко описаний у науковій літературі ефект [191, 192]. Але можна констатувати, що міцність на стиск всіх досліджених в рамках даного експерименту бетонів і фібробетонів в проектному віці була вище, ніж вимагається нормативними документами України для бетонів жорстких дорожніх покриттів [267] та покриттів аеродромів. Проте для ремонтних складів, а також при влаштуванні покриттів за необхідності швидкого відкриття трафіку такий певний «запас» по міцності у

віці 28 діб не є критичним, тому що важливішим показником якості в цьому разі є рання міцність, на що наголошувалося вище. Також аналіз наведеної на рис.4.6 діаграми показує, що певне зниження міцності на стиск у віці 28 діб при використанні прискорювача Sika Rapid 3 повністю компенсується використанням дисперсного армування сталеву анкерною фіброю. Тобто фібробетон з кількістю прискорювача твердіння 2,4% і фібри 100 кг/м³ має міцність на рівні 85 МПа, що аналогічно проектній міцності бетону без прискорювача твердіння 2,4% і фібри 100 кг/м³.

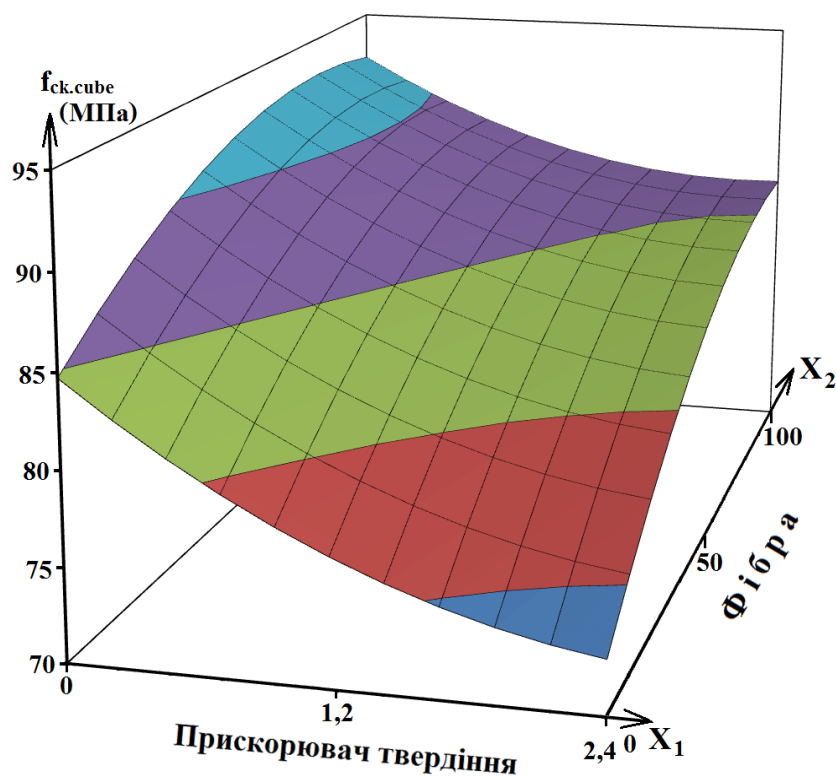


Рис.4.6 Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб

Таким чином, комплексне використання раціональної кількості дисперсного армування сталеву фіброю, а також суперпластифікатора полікарбоксилатного типу MasterGlenium SKY 608 і прискорювача твердіння Sika Rapid 3, є ефективним методом підвищення міцності на стиск бетонів для влаштування і ремонту жорстких дорожніх та аеродромних покриттів.

Також на даному етапі аналізувалася міцність досліджених бетонів і фібробетонів на розтяг при згині у ранньому і проектному віці. Цей показник можна вважати основною характеристикою для дорожніх і аеродромних покриттів, тому що вони працюють як плита на пружній основі. Для жорстких бетонних покриттів міцність на розтяг при згині особливо важлива через те, що цементобетон погано сприймає розтягуючі напруження від дії згинальних моментів.

За наведеними у таблиці 4.3 даними була побудована ЕС-модель, що відображає вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів у віці 2-х діб:

$$f_{\text{ctk.2}} \text{ (МПа)} = 8,42 + 0,26x_1 + 0,02x_1^2 + 0,05x_1x_2 + 1,55x_2 - 1,08x_2^2 . \quad (4.4)$$

Поле властивостей ЕС-моделі (4.4) має мінімальне значення $f_{\text{ctk.2.min}} = 5,61$ МПа у точці з координатами $x_1 = x_2 = -1$, тобто для складу без прискорювача твердіння і фібри, максимальне значення $f_{\text{ctk.2.max}} = 9,28$ МПа мають склади у точці з координатами $x_1 = 1$, $x_2 = 0,74$.

За ЕС-моделлю (4.4) побудовані однофакторні діаграми, що відображають вплив у зонах екстремумів варійованих факторів на міцність на розтяг при згині у віці 2-х діб досліджених бетонів і фібробетонів, та які показані на рис.4.7.

Аналіз наведених на рис.4.7 діаграм показує, що на величину міцності на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів у віці 2-х діб в найбільшій мірі впливає кількість сталеві анкерної фібри. Характерно, що цей вплив має явно виражений нелінійний характер і при підвищенні дозування волокон у складі бетону до 50..60 кг/м³ його рання міцність на розтяг при згині зростає більше, ніж на 2 МПа. Найвищих значень (8,7..9,3 МПа) величина $f_{\text{ctk.2}}$ досягає при дозуванні фібри в діапазоні 85..90 кг/м³, подальше підвищення кількості металевих волокон вже негативно відображається на значенні ранньої міцності на розтяг при згині.

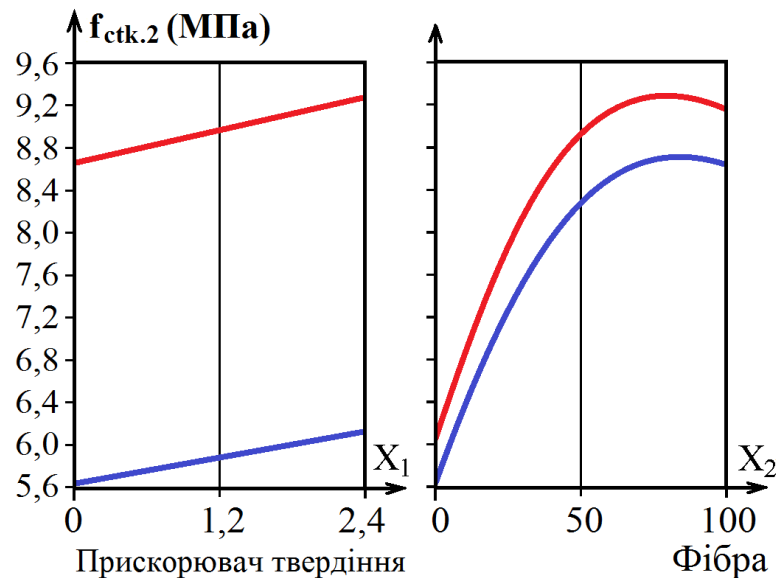


Рис.4.7 Вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів у віці 2-х діб в зонах екстремумів

За рахунок використання прискорювача твердіння Sika Rapid 3 рання міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів зростає, але досить обмежено – на величину до 0,7 МПа при використанні максимальної кількості модифікатору.

Сумісний вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів у віці 2-х діб відображено на діаграмі на рис.4.8, яка побудована за ЕС-моделлю (4.4).

Аналіз наведеної на рис.4.8 діаграми показує, що при кількості прискорювача твердіння Sika Rapid 3 у складі фібробетону від 1,2% та при дозуванні сталеві фібри у кількості 60 кг/м³ і вище рання міцність композиту на розтяг при згині (у віці 2-х діб) є не меншою 8,5 МПа. Такий рівень міцності на розтяг при згині бетону дозволяє починати експлуатацію дорожнього або аеродромного покриття фактично для всіх типів конструкцій. Тобто з врахуванням високої ранньої міцності на стиск, що описано вище, вже після 2-х діб по завершенню влаштування покриття або ремонтних робіт з використанням модифікованого фібробетону в більшості випадків на дорозі можна відкривати рух автотранспорту, аналогічно можна дозволяти рух повітряних суден.

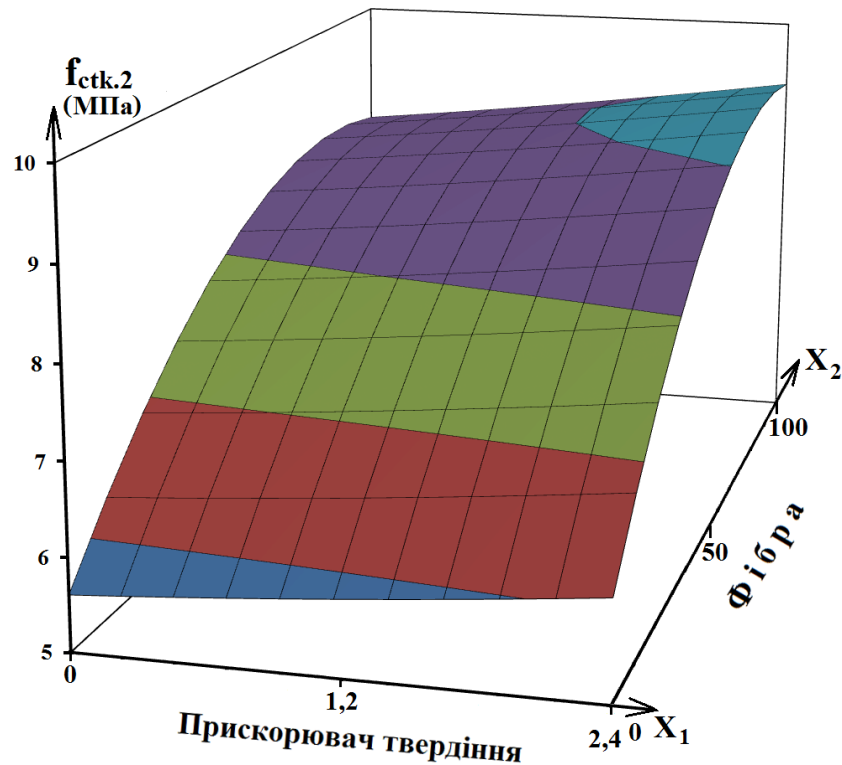


Рис.4.8 Вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб

Вплив варійованих факторів складу на величину міцності на розтяг при згині бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб відображає наведена нижче ЕС-модель, що побудована за наведеними у таблиці 4.3 даними:

$$f_{ctk}(\text{МПа}) = 15,27 - 0,81x_1 + 0,35x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 4,10x_2 - 3,70x_2^2. \quad (4.5)$$

Для даної моделі поле властивостей має мінімальне значення $f_{ctk.min} = 7,00$ МПа у точці з координатами $x_1 = 1$, $x_2 = -1$, що відповідає складу з найбільшим дозуванням прискорювача твердіння і без фібри, максимальне значення $f_{ctk.max} = 17,57$ МПа демонструють склади у точці з координатами $x_1 = -1$, $x_2 = 0,56$, що відповідає складу без прискорювача твердіння і з кількістю сталеві фібри близько 78 кг/м^3 .

За даними ЕС-моделі (4.5) були побудовані показані на рис.4.9 однофакторні діаграми, що відображають вплив варійованих факторів на міцність на розтяг при згині бетону в зонах екстремумів у проектному віці.

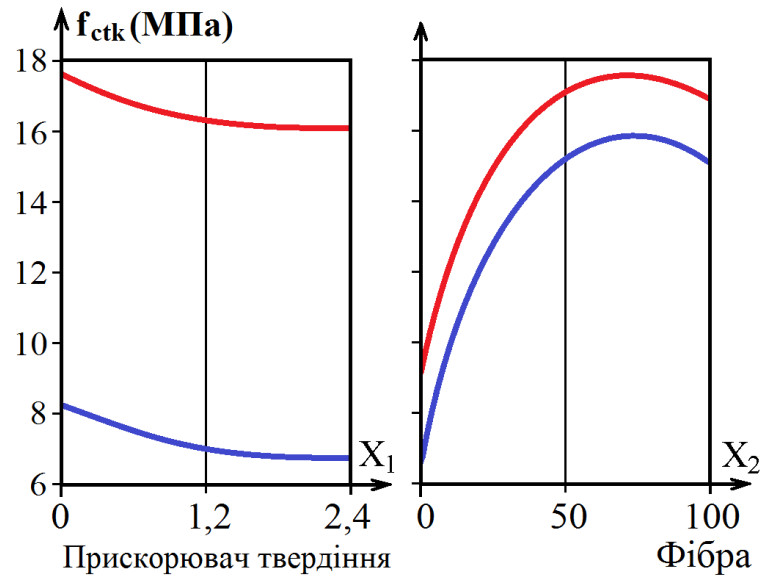


Рис.4.9 Вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб в зонах екстремумів

Як видно з наведених на рис.4.9 діаграм, при додаванні до складу бетону прискорювача твердіння Sika Rapid 3 його міцність на розтяг при згині у проектному 28-ми денному віці дещо знижується. Це зниження обмежується 10..12% від міцності бетону без прискорювача при відповідній кількості фібри. Ефект певного негативного впливу добавки прискорювача твердіння на міцність на розтяг при згині є аналогічним за типом ефекту впливу даного модифікатора на міцність на стиск у проектному віці. Цей ефект, як зазначалося вище, описано у науковій літературі, зокрема у роботах [163, 191]. Проте використання добавки Sika Rapid 3 дозволяє досягнути покращення фізико-механічних властивостей у ранньому віці, що показано вище. За рахунок дисперсного армування анкерною сталевією фіброю у кількості 70..90 кг/м³ міцність на розтяг при згині бетонів у віці 28-ми діб підвищується більше, ніж у 2 рази: з 7..8,5 МПа до 15,5..17,5 МПа. Така висока ефективність анкерної фібри саме у більшому (проектному) віці пояснюється тим, що якість роботи

волокон в значній мірі обумовлена їх зчепленням з цементно-піщаною матрицею, а з віком міцність бетону і відповідно даної матриці зростає [110, 111].

Також за ЕС-моделлю (4.5) була побудована наведена на рис.4.10 діаграма, яка відображає сумісний вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб.

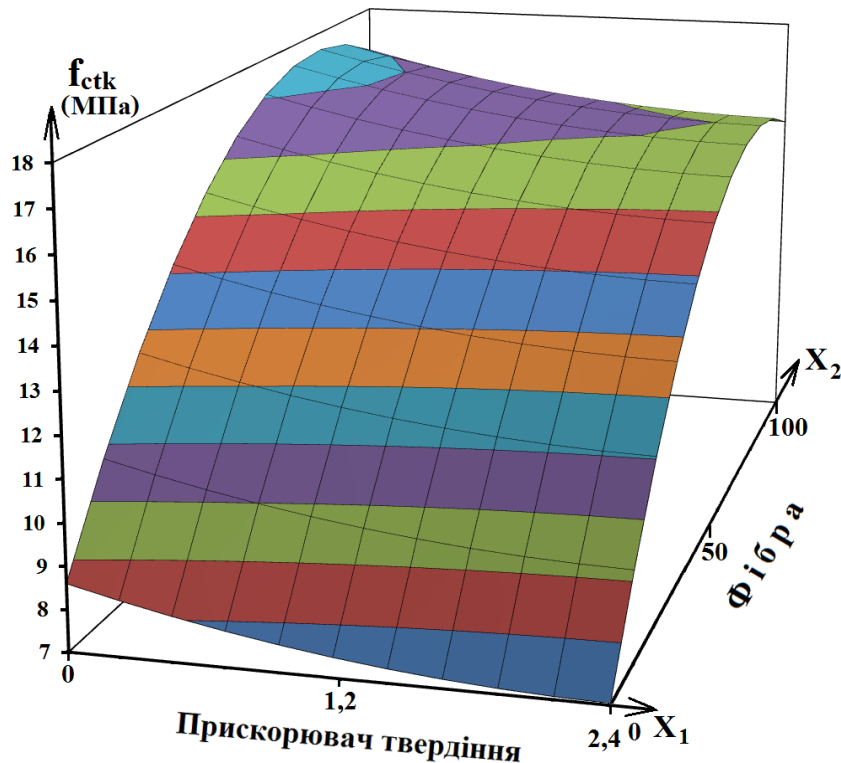


Рис.4.10 Вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів у віці 28-ми діб

Як показує аналіз наведеної на рис. 4.10 діаграми, при використанні сталеві анкерної фібри у кількості більше 60 кг/м^3 міцність фібробетонів на розтяг при згині у проектному віці складає не менш 16 МПа, що забезпечує якісну роботу матеріалу в якості дорожнього або аеродромного покриття при самих високих навантаженнях.

В цілому проведені дослідження міцності модифікованих суперпластифікатором MasterGlenium SKY 608 фібробетонів (з кількістю добавки 1,2% від маси цементу) показали, що при використанні раціональної кількості прискорювача твердіння Sika Rapid 3 і сталеві анкерної фібри дані

матеріали характеризуються високою міцністю на стиск і на розтяг при згині як в ранньому віці, так і у проектному віці 28-ми діб. Це дозволяє стверджувати про високу ефективність розроблених модифікованих фібробетонів у якості матеріалу для влаштування і ремонту жорстких дорожніх та аеродромних покриттів. При цьому важливо забезпечити необхідну довговічність ремонтного матеріалу, а для ремонтних складів також їх адгезію до старого бетону.

4.3 Вплив сталеві фібри і прискорювача твердіння на морозостійкість та зносостійкість бетонів

Особливості умов експлуатації бетонів дорожніх і аеродромних покриттів обумовлюють дію заморожування і відтавання, а також абразивний вплив коліс як найбільш впливових чинників, які викликають деструкцію бетону. Відповідно морозостійкість та зносостійкість бетонів в найбільшій мірі обумовлюють довговічність жорстких покриттів [268, 269], зокрема після їх ремонту.

Як вказано у п.2.2, морозостійкість бетонів визначалася прискореним методом згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 (третій метод) [211]. Згідно ДСТУ, марку за морозостійкістю приймають за відповідну тій, що вимагається, якщо середнє значення міцності на стиск зразків після установлених для даної марки кількості циклів поперемінного заморожування і відтавання (таблиця 3 ДСТУ Б В.2.7-47 [212]) зменшилась не більше ніж на 5% у порівнянні із середньою міцністю на стиск контрольних зразків. Для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів втрата маси зразків не повинна перевищувати 3%.

Результати визначення втрати міцності та маси зразків досліджених бетонів і фібробетонів (у порівнянні з контрольними) після 10, 15 і 20 циклів заморожування до $-50\pm 5^{\circ}\text{C}$ і відтавання у 5% розчині хлористого натрію наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Визначення морозостійкості бетонів згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 «Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні» (третій метод)

№ складу	X ₁ , прискорювач твердіння	X ₂ , фібра	Втрата міцності після заморожування до -50±5°C і відтавання у 5% розчині хлористого натрію, %			Втрата маси зразків після заморожування до -50±5°C і відтавання у 5% розчині хлористого натрію, %			Оцінка морозостійкості
			10 циклів	15 циклів	20 циклів	10 циклів	15 циклів	20 циклів	
1	-1	-1	1,26	1,98	4,91	0,30	0,30	1,18	F200
2	0	-1	1,58	2,74	5,93	0,30	1,57	1,87	F150
3	+1	-1	1,80	4,63	6,96	0,40	0,99	2,29	F150
4	-1	0	1,16	1,85	4,78	0,31	0,48	1,12	F200
5	0	0	1,42	2,45	4,86	0,39	1,16	1,61	F200
6	+1	0	2,16	3,80	4,88	0,20	0,79	1,79	F200
7	-1	+1	0,77	2,07	4,90	0,38	0,59	1,37	F200
8	0	+1	0,87	3,33	4,88	0,39	0,78	1,36	F200
9	+1	+1	0,84	3,35	4,92	0,59	0,79	1,28	F200

Фото зразків бетону складу №6 після 20 циклів заморожування і відтавання наведені на рис.4.11.



Рис.4.11 Фото зразків бетону складу №6 після 20 циклів заморожування при температурі $-50\pm 5^{\circ}\text{C}$ і відтавання у 5% розчині хлористого натрію

Аналіз наведених у таблиці даних дозволяє зробити висновок, що всі фібробетони зі сталевією фіброю (№4..9) мають морозостійкість F200, що забезпечує їх високу довговічність в типових для України кліматичних умовах. Бетон складу №1 (без фібри і прискорювача твердіння) також характеризуються морозостійкістю на рівні F200. При використанні прискорювача твердіння за умови відсутності дисперсного армування (бетони складів №2 і №3) морозостійкість матеріалу знижується до рівня F150.

Слід відзначити, що точність оцінки морозостійкості досліджених на даному етапі роботи бетонів суттєво обмежена дискретним методом визначення показника. Тобто при використанні прискореного методу для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів ДСТУ розрізняє марки F100, F150, F200, F300, F400 і так далі. Проте в цілому ця дискретність не заважає оцінити напрям впливу варійованих факторів на рівень F.

Факт зниження морозостійкості неармованих дисперсною арматурою бетонів при використанні прискорювача твердіння Sika Rapid 3 вказує на

обмежено негативний вплив модифікатору на даний фізико-механічний показник. Зниження морозостійкості можна пояснити загальним зниженням міцності композиту у проектному віці при використанні модифікатору Sika Rapid 3.

Використання сталеві анкерної фібри в цілому сприяє підвищенню морозостійкості бетонів для влаштування і ремонту жорстких покриттів. Це підтверджується тим, що дисперсно-армовані бетони незалежно від кількості прискорювача твердіння мають морозостійкість на рівні F200. Цього рівня морозостійкості досліджених фібробетонів цілком вистачає для будівництва жорстких дорожніх та аеродромних покриттів, а також для проведення ремонтних робіт, тому що згідно ДСТУ 8858:2019 [270] марка за морозостійкістю при новому будівництві доріг повинна бути не менше F200.

Для дорожніх покриттів зносостійкість є важливою характеристикою, яка в значній мірі визначає їх довговічність. Звичайно, відремонтовані ділянки доріг піддаються впливу шин транспорту (тобто зносу) менш тривалий час, ніж основне покриття. Проте і для ремонтних бетонів також важливо забезпечити достатню зносостійкість, зокрема через те, що як показано у [268], цей показник впливає на здатність матеріалу протистояти комплексному морозо-сольовому впливу. При цьому у [271, 272] рекомендується застосовувати в дорожньому будівництві бетони зі стираністю не вище 0,50 г/см².

Дані щодо стираності досліджених бетонів і фібробетонів у 9-ти контрольних точках плану експерименту наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Стираність досліджених бетонів і фібробетонів

№ складу	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Стираність, (г/см ²)	0,30	0,32	0,34	0,22	0,24	0,26	0,20	0,24	0,25

За даними, наведеними у таблиці, побудована наведена нижче ЕС-модель, що відображає вплив кількості прискорювача твердіння і сталеві анкерної фібри на стиранисть досліджених на даному етапі роботи бетонів і фібробетонів:

$$G \text{ (г/см}^2\text{)} = 0,243 + 0,022x_1 - 0,005x_1^2 + 0,002x_1x_2 - 0,045x_2 + 0,035x_2^2 . \quad (4.6)$$

Поле властивостей ЕС-моделі (4.6) має мінімальне значення $G_{\min} = 0,201 \text{ г/см}^2$ у точці з координатами $x_1 = -1$, $x_2 = 0,677$, тобто найбільша зносостійкість (найменша стиранисть) спостерігається для складу без прискорювача твердіння та з кількістю фібри приблизно 83 кг/м^3 . Максимальне значення $G_{\max} = 0,338 \text{ г/см}^2$ спостерігається у точці з координатами $x_1 = 1$, $x_2 = -1$, тобто для складу з максимальним вмістом прискорювача твердіння та без фібри.

За ЕС-моделлю (4.6) була побудована показана на рис.4.12 діаграма, яка відображає сумісний вплив двох варійованих факторів на стиранисть досліджених бетонів і фібробетонів.

Аналіз діаграми показує, що дисперсне армування при кількості сталеві анкерної фібри $80..100 \text{ кг/м}^3$ знижує стиранисть бетону на $30..35\%$, до значень у межах $0,21..0,25 \text{ г/см}^2$, тобто суттєво підвищує зносостійкість матеріалу.

Склади з максимальною кількістю прискорювача твердіння без сталеві волокна характеризуються більш високою стиранистю ($0,30-0,33 \text{ г/см}^2$), проте фібробетони практично незалежно від кількості прискорювача твердіння Sika Rapid 3 характеризуються досить низьким показником стиранисті, тобто високою зносостійкістю.

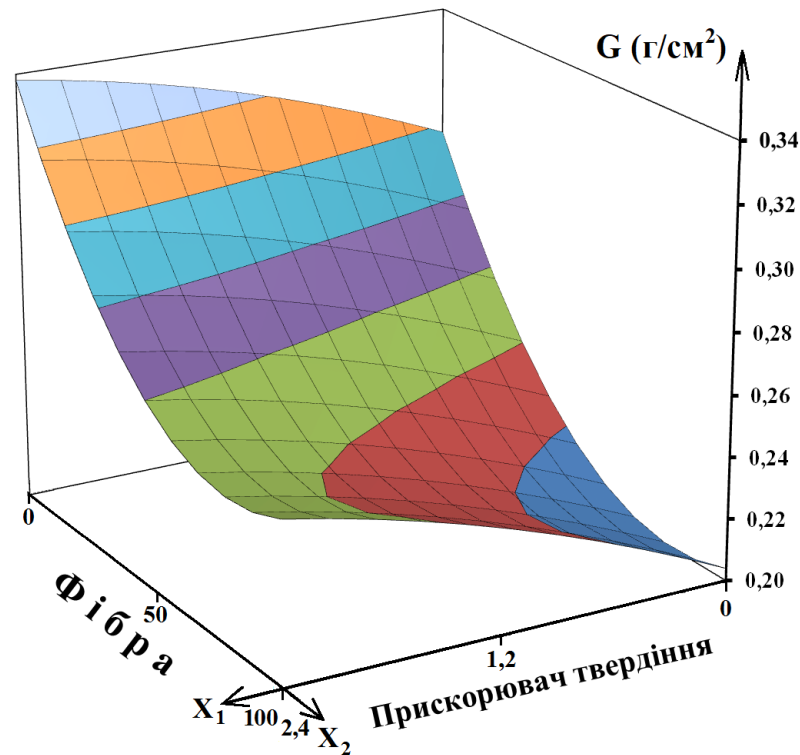


Рис.4.12 Вплив варійованих факторів складу на стиранисть бетонів і фібробетонів

Таким чином, фактично незалежно від кількості прискорювача твердіння модифіковані суперпластифікатором MasterGlenium SKY 608 фібробетони з кількістю сталеві анкерної фібри від 75 кг/м^3 характеризуються високою морозостійкістю (F200) і зносостійкістю (стиранисть $G < 0,25 \text{ г/см}^2$), що забезпечує достатню довговічність матеріалу для влаштування і ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

4.4 Дослідження усадки бетонів і фібробетонів

Для ремонтних матеріалів усадка є важливим показником якості, оскільки саме через усадочні деформації може порушуватися його адгезія до цементобетонного дорожнього або аеродромного покриття, що ремонтується [256, 273, 274]. При влаштуванні нових покриттів величина усадочних деформацій також є важливою з позиції тріщиноутворення матеріалу та якості роботи на попередньому шарі дорожнього одягу. Тобто необхідною є

мінімізація усадочних деформацій як за рахунок відповідних технологічних операцій при влаштуванні та ремонті, насамперед завдяки здійсненню догляду за бетоном, так і за рахунок застосування модифікаторів та дисперсного армування. Відомо [275], що найбільш важливим структурним показником для мінімізації усадки бетону є В/Ц суміші. Як відзначено вище, всі досліджені на даному етапі бетони модифікувалися раціональною кількістю суперпластифікатора полікарбоксилатного типу MasterGlenium SKY 608 (1,2% від маси цементу), що забезпечувало мінімальне В/Ц. Відповідно було досліджено вплив кількості прискорювача твердіння і сталеві фібри на усадку бетонів для ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

Усадка бетону при твердінні в повітряно-сухих умовах визначалася наступним чином. Бетонні призми розміром 10×10×40 см першу добу після формування зберігалися у формах у камері нормального твердіння. Після цього призми розпалублювалися та розміщувалися у повітряно-сухих умовах (вологість 60±5%, температура 20±2 °С згідно ДСТУ Б В.2.7-216:2009 [213]). Така постановка експерименту в цілому дозволила створити умови твердіння бетонів, які близькі до умов твердіння, включаючи ремонтні, на автомобільних дорогах та аеродромних покриттях. Також методика експерименту за розмірами зразків і термінами визначення деформацій відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-216:2009 «Бетони. Методи визначення деформацій усадки та повзучості» [213].

За допомогою індикаторів годинникового типу, зафіксованих на штативах, фіксувалася усадка зразків-призм після 3 годин, 6 годин, 1, 2, 3 і 7 діб знаходження у повітряно-сухих умовах (рис.2.3). Дані щодо усадки бетонів різних складів (усереднені за результатами визначення усадки 3-х зразків у кожній точці плану) наведені у таблиці 4.6.

За наведеними у таблиці 4.6 даними побудовані показані на рис.4.13 графіки, які відображають вплив кількості фібри на усадку бетонів з різною кількістю прискорювача твердіння Sika Rapid 3 у складі.

Усадка бетонів і фібробетонів при твердінні у повітряно-сухих умовах

№ складу	X ₁ , прискорювач твердіння	X ₂ , фібра	Усадка $\varepsilon \times 10^{-4}$					
			3 години	6 годин	1 доба	2 доби	3 доби	7 діб
1	-1	-1	0,609	0,865	1,218	1,376	1,445	1,604
2	0	-1	0,653	0,89	1,221	1,342	1,383	1,507
3	+1	-1	0,725	0,942	1,21	1,312	1,365	1,465
4	-1	0	0,565	0,748	1,07	1,211	1,275	1,353
5	0	0	0,564	0,718	1,035	1,163	1,225	1,325
6	+1	0	0,660	0,82	1,082	1,203	1,214	1,337
7	-1	+1	0,505	0,733	1,035	1,179	1,235	1,340
8	0	+1	0,528	0,75	1,031	1,153	1,212	1,304
9	+1	+1	0,668	0,827	1,075	1,195	1,215	1,311

Аналіз наведених графіків показує, що процес усадки очікувано не завершується після 7 діб твердіння бетону, проте загальний характер впливу варійованих факторів складу на його величину є достатньо вираженим.

Незалежно від кількості прискорювача твердіння, дисперсно-армовані бетони як при кількості фібри 50 кг/м³, так і при кількості фібри 100 кг/м³ характеризуються відчутно меншою усадкою в порівнянні з неармованими. Це пояснюється здатністю каркасу фібри утримувати структурні блоки композиту від переміщення при втраті вологи у процесі структуроутворення [276, 277]. Той факт, що склади з кількістю сталеві фібри 50 кг/м³ і 100 кг/м³ характеризуються практично однаковою усадкою, можна пояснити тим, що при зростанні кількості дисперсної арматури у складі зростає В/Ц суміші. Відповідно позитивний вплив просторової сітки арматури нівелюється впливом підвищеної кількості води у бетонній суміші.

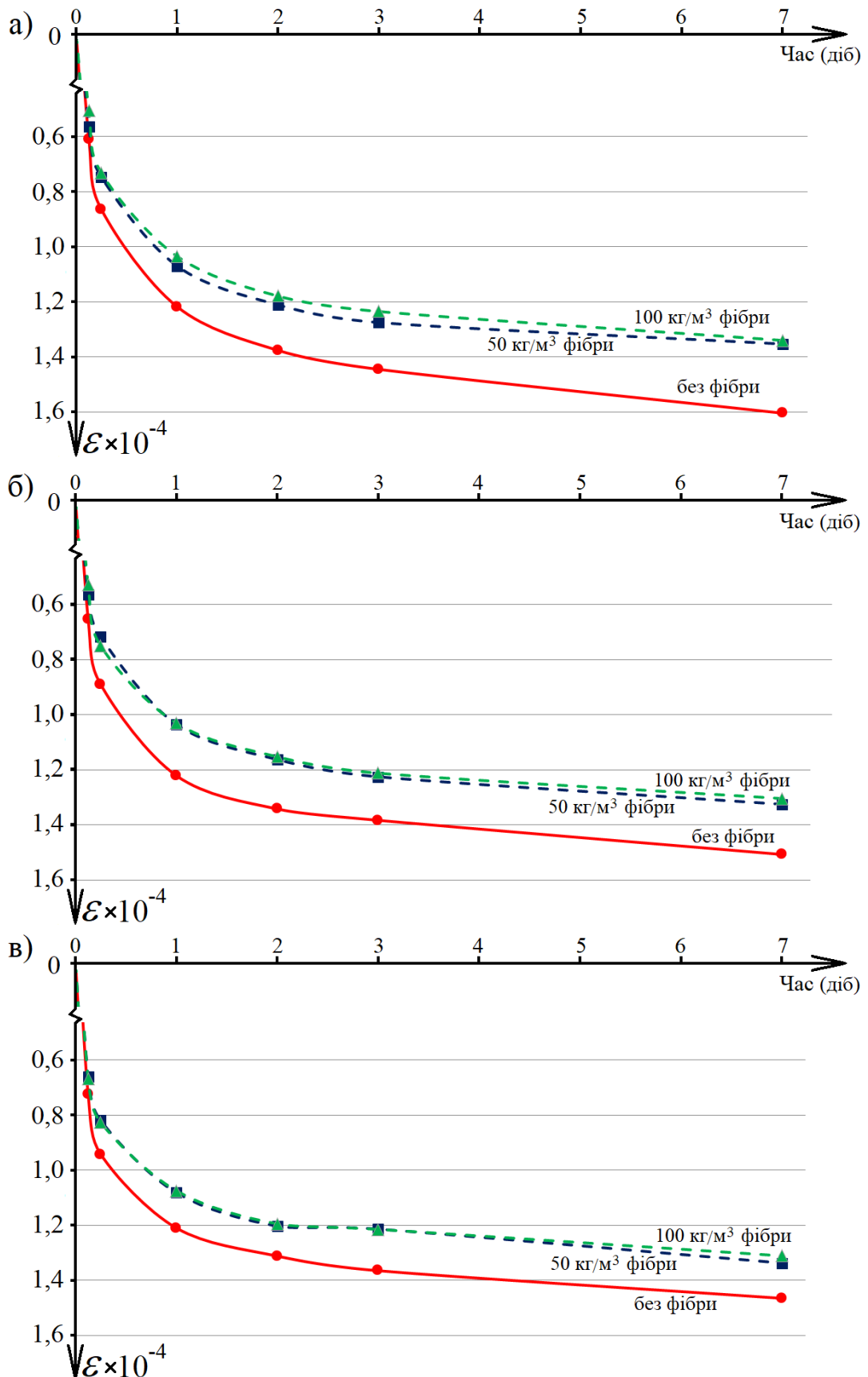


Рис.4.13 Усадка бетонів і фібробетонів при твердінні в повітряно-сухих умовах:

а) бетони без прискорювача твердіння (№1, №4, №7);

б) 1,2% прискорювача твердіння Sika Rapid 3 (№2, №5, №8);

в) 2,4% прискорювача твердіння Sika Rapid 3 (№3, №6, №9).

Кількість прискорювача твердіння також впливає на величину усадки досліджених бетонів, але менш суттєво. За рахунок введення максимальної кількості Sika Rapid 3 усадка бетону у віці 7 діб знижується на 3..9%, при введенні 1,2% даного модифікатора – на 2..7%. Ефект зниження усадки за рахунок застосування прискорювача пояснюється тим, що внутрішні напруження у композиційному матеріалі, що виникають в процесі структуроутворення та втрати вологи, утримуються більш міцною в ранні терміни твердіння цементно-піщаною матрицею [278].

Таким чином, використання дисперсного армування анкерною сталеву фібрую і прискорювача твердіння дозволяє знизити усадку бетону, що важливо для матеріалу для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

Для визначення граничної усадки бетону для зразків складу №1 (без фібри і прискорювача) також вимірювалася усадка у віці 14, 28, 42, 56, 70, 84 і 98 діб. Значення усадки у визначені терміни відповідно склали 1,604, 1,827, 2,151, 2,327, 2,435, 2,494 і 2,501 ($\times 10^{-4}$). Тобто після 84 діб твердіння усадка стабілізувалася і значення усадки у віці 96 діб фактично не відрізнялися від значень у віці 84 діб. Таким чином гранична усадка для бетону без дисперсної арматури і прискорювача склала $\varepsilon \approx 2,5 \times 10^{-4}$ (або 0,25 мм/м) що відповідає вимогам діючих нормативних документів.

Для виявлення загального характеру впливу варійованих факторів складу на усадку досліджених бетонів і фібробетонів за наведеними у таблиці 4.6 даними була побудована ЕС-модель зміни величини усадки у віці 7 діб ε_7 :

$$\begin{aligned} \varepsilon_7 \times 10^{-4} = & 1,323 - 0,031x_1 + 0,023x_1^2 + 0,027x_1x_2 \\ & - 0,104x_2 + 0,083x_2^2 . \end{aligned} \quad (4.7)$$

За даною ЕС-моделю була побудована показана на рис.4.14 діаграма. Усадка у віці 7 діб не є граничною, але загальний характер впливу факторів на значення ε_7 і граничну усадку є аналогічним. Відповідно аналіз впливу

варійованих факторів на ε_7 дозволяє робити висновки щодо їх ефективності при зниженні усадки матеріалу для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів в цілому.

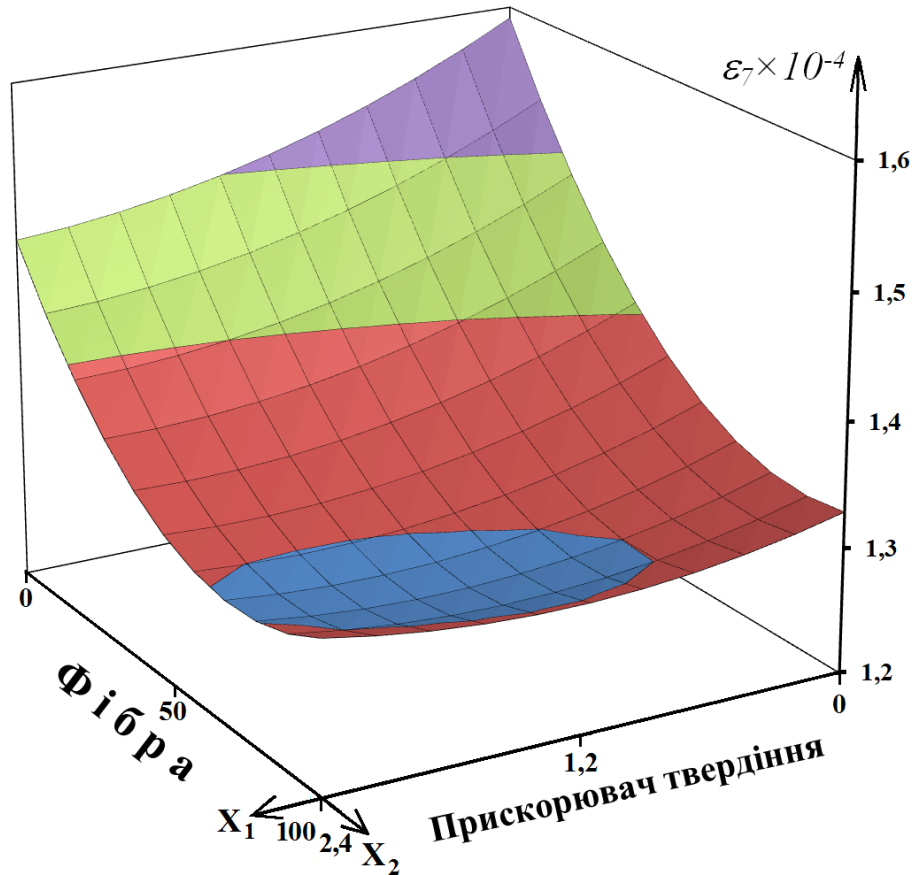


Рис.4.14 Вплив варійованих факторів складу на усадку бетонів і фібробетонів після 7 діб твердіння бетону у повітряно-сухих умовах

Як видно з наведеної на рис.4.14 діаграми, при кількості сталеві фібри від 60 до 90 кг/м³ і кількості прискорювача твердіння від 0,9 до 2,4% усадка досліджених бетонів є мінімальною ($\varepsilon_7 = 1,3 \times 10^{-4}$).

Таким чином, за рахунок використання раціональної кількості анкерної сталеві фібри (50..90 кг/м³) і прискорювача твердіння (1,0..2,1% від маси цементу) усадка бетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів знижується на 18..20%. Після 7 діб твердіння у повітряно-сухих умовах усадка фібробетону з прискорювачем становить $1,29 \times 10^{-4}$, а бетону без фібри і прискорювача – $1,60 \times 10^{-4}$. При цьому гранична

усадка бетонів складає не більше $\varepsilon \approx 2,5 \times 10^{-4}$, або 0,25 мм/м. Мінімізації об'ємних змін при твердінні дозволяють прогнозувати високу стійкість бетону від розтріскування і забезпечити кращою адгезією до основи, що важливо для бетонів, які використовуються для влаштування дорожніх і аеродромних покриттів, а також особливо важливо для ремонтних матеріалів.

4.5 Адгезія досліджених фібробетонів до бетонної основи

Досліджені швидкотвердіючі бетони і фібробетони призначені не лише для влаштування жорстких покриттів, а в більшій мірі для виконання глибинного ремонту даних покриттів. Для ремонтних матеріалів адгезія до основи, тобто до матеріалу конструкції, що ремонтується, є одним з найбільш важливих показників якості. При виконанні глибинного ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів (full depth repair) в більшості випадків ремонтний матеріал укладається у відповідну виїмку, яка знаходиться на місці дефекту та за необхідності її краї додатково вирізаються для отримання кромки з кутом, близьким до прямого. Тобто масив ремонтного матеріалу може працювати як окрема плита. Проте під дією динамічних навантажень, у разі втрати зчеплення з основою відремонтована ділянка може швидше зруйнуватися через меншу товщину шару ремонтного матеріалу в порівнянні з основним покриттям [277]. Крім того, в більшості випадків дефекти в покриттях утворюються в районі швів, відповідно виїмка не буде оточена «старим» бетоном з усіх боків.

Величина адгезійної міцності досліджених бетонів і фібробетонів до бетонної основи визначалася за методикою EN 1542:1999 «Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods» [279] з використанням адгезиметру Proseq Dyna-Z16. Для цього на зразки бетону класу C32/40 розміром 30×30×10 см, вік яких становив 1,5 місяці, наносився шар бетону ремонтного складу товщиною 30 мм. Поверхня зразка відповідала вимогам EN 1542:1999 [279]. Після 3 діб твердіння на шар ремонтного бетону

швидкотвердіючим клеєм Sika AnchorFix-1 приклеювалася сталеві пластина розміром 10×10 см. Після 28 діб твердіння ремонтного матеріалу пластину з бетоном відривали від основи і визначали адгезійну міцність (рис.4.15).



Рис.4.15 Визначення адгезійної міцності за методикою EN 1542:1999

Також адгезійна міцність бетонів і фібробетонів визначалася методом розтягу при згині зразків-балок розміром 10×10×40 см. Одна половина балок була виготовлена зі «старого бетону» класу C32/40, тобто виготовлялася заздалегідь і на момент нанесення ремонтного бетону мала вік порядку 2х місяців. Друга половина виготовлялася з дослідженого бетону або фібробетону (ремонтного складу), що укладався у форму, в якій знаходилася половинка зі «старого бетону». Тобто новий бетон контактував зі старим через торцеву поверхню «старої» половини. При такій методиці адгезійна міцність визначалася розтягом при згині з використанням 3х точкової схеми навантаження (Рис.4.16).

Фото процесу визначення адгезійної міцності методом розтягу при згині та приклад зламу зразка наведено на рис.4.17.

При цьому визначалася адгезійна міцність всіх 9 досліджених складів бетонів і фібробетонів (як ремонтних матеріалів) при двох варіантах попередньої обробки поверхні зразка, який імітував поверхню жорсткого покриття при ремонті (Таблиця 4.7):

при лише змочуванні поверхні основи, R (МПа);

при обробці поверхні основи ґрунтовою ІЗОГРУНТ у кількості близько $0,25 \text{ кг/м}^2$, R_r (МПа).

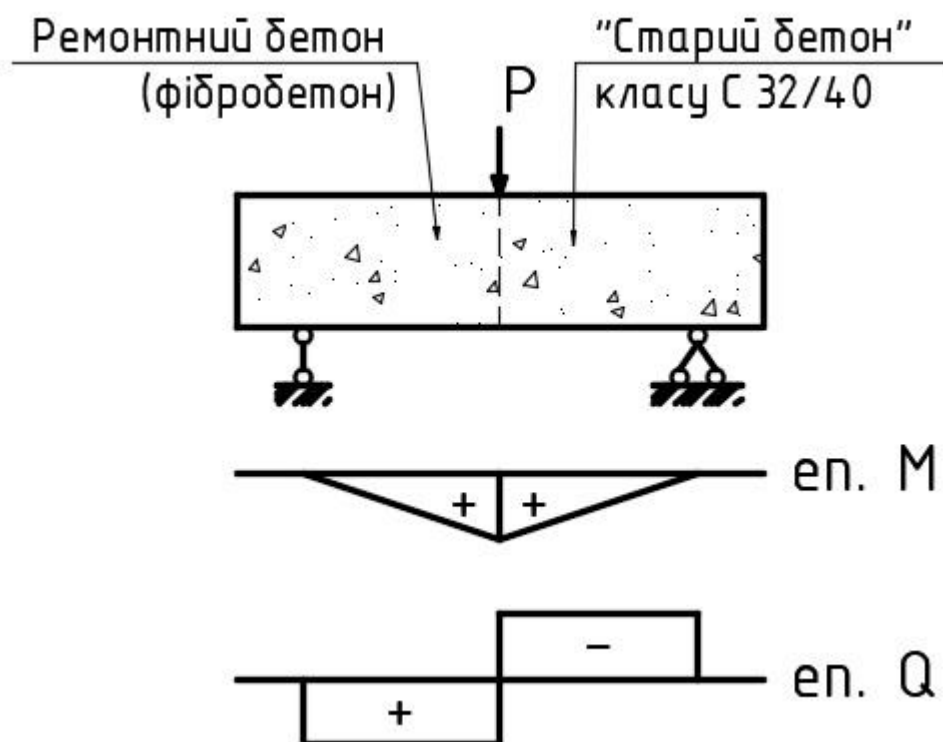


Рис.4.16 Схема визначення адгезійної міцності методом розтягу при згині

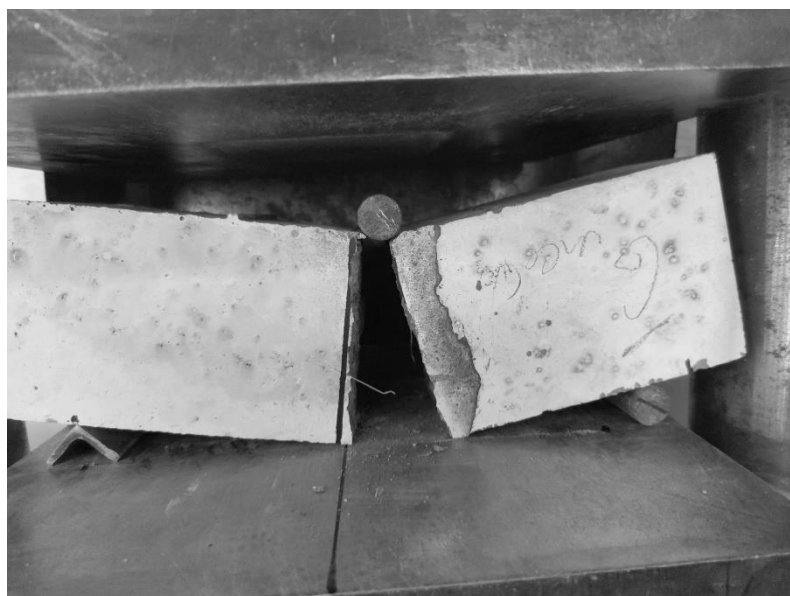


Рис.4.17 Визначення адгезійної міцності методом розтягу при згині та фото зламу зразка

Адгезійна міцність досліджених бетонів і фібробетонів

№ складу	X ₁ , прискорювач твердіння	X ₂ , фібра	Адгезійна міцність, визначена методом відриву згідно EN 1542:1999 (МПа)		Адгезійна міцність, визначена методом розтягу при згині (МПа)	
			Змочування поверхні (R)	Ґрунтування поверхні (R _ґ)	Змочування поверхні (R _{зг})	Ґрунтування поверхні (R _{зг.ґ})
1	-1	-1	2,59	2,71	2,15	2,35
2	0	-1	2,40	2,50	2,09	2,18
3	+1	-1	2,29	2,32	2,05	2,16
4	-1	0	2,72	2,94	2,28	2,51
5	0	0	2,55	2,79	2,18	2,39
6	+1	0	2,47	2,63	2,10	2,32
7	-1	+1	2,85	3,02	2,34	2,56
8	0	+1	2,63	2,89	2,21	2,40
9	+1	+1	2,54	2,67	2,12	2,32

За наведеними у таблиці 4.7 даними були побудовані наведені нижче ЕС-моделі, які відображають вплив варійованих факторів на адгезійну міцність, визначену методом відриву, відповідно при змочуванні поверхні зразка (R) та при обробці поверхні ґрунтовкою (R_ґ):

$$R \text{ (МПа)} = 2,55 - 0,14x_1 + 0,05x_1^2 \pm 0 x_1x_2 + 0,12x_2 - 0,03x_2^2 ; \quad (4.8)$$

$$R_{\text{ґ}} \text{ (МПа)} = 2,79 - 0,18x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0 x_1x_2 + 0,18x_2 - 0,10x_2^2 . \quad (4.9)$$

а також на адгезійну міцність, визначену методом розтягу при згині ($R_{зг}$ – при змочуванні поверхні зразка, $R_{зг.г}$ – при обробці поверхні ґрунтовкою:

$$R_{зг} \text{ (МПа)} = 2,18 - 0,08x_1 + 0,01x_1^2 - 0,03 x_1x_2 + 0,06x_2 - 0,03x_2^2 ; \quad (4.10)$$

$$R_{зг.г} \text{ (МПа)} = 2,38 - 0,10x_1 + 0,05x_1^2 - 0,01 x_1x_2 + 0,10x_2 - 0,08x_2^2 . \quad (4.11)$$

За ЕС-моделями (4.8) – (4.11) були побудовані діаграми, показані на рис.4.18. Аналіз даних діаграм, а також даних таблиці 4.7 показує, що всі досліджені бетони і фібробетони характеризуються достатньо високою адгезійною міцністю до старого бетону, від 2,3 МПа при використанні методу відриву та від 2,05 МПа при використанні методу розтягу при згині. За рахунок обробки поверхні «старого» бетону ґрунтовкою ІЗОГРУНТ адгезійна міцність складів, які використовуються для ремонту, підвищується на 0,09..0,24 МПа, що в середньому складає 6,2% при визначенні адгезійної міцності методом відриву та 8,5% при визначенні адгезійної міцності методом розтягу при згині. Тобто технологічний прийом нанесення ґрунтовки можна рекомендувати для найбільш завантажених ділянок відремонтованих покриттів, насамперед у районі швів, а також на краях плит.

Дисперсне армування сталеву фібру відчутно підвищує адгезійну міцність складів при їх використанні в якості ремонтних. Так при застосуванні волокон у кількості 50 кг/м³ величина визначеної різними методами адгезії підвищується на 0,16..0,19 МПа (7-9%). При дозуванні фібри у кількості 90..100 кг/м³ адгезія зростає на 0,24..0,36 МПа, тобто 11..15% у порівнянні з неармованими бетонами. Такий ефект пояснюється як зростанням міцності самого ремонтного складу за рахунок дисперсного армування (п.4.2), так і зниженням усадки бетону при твердінні за рахунок армування (п.4.4).

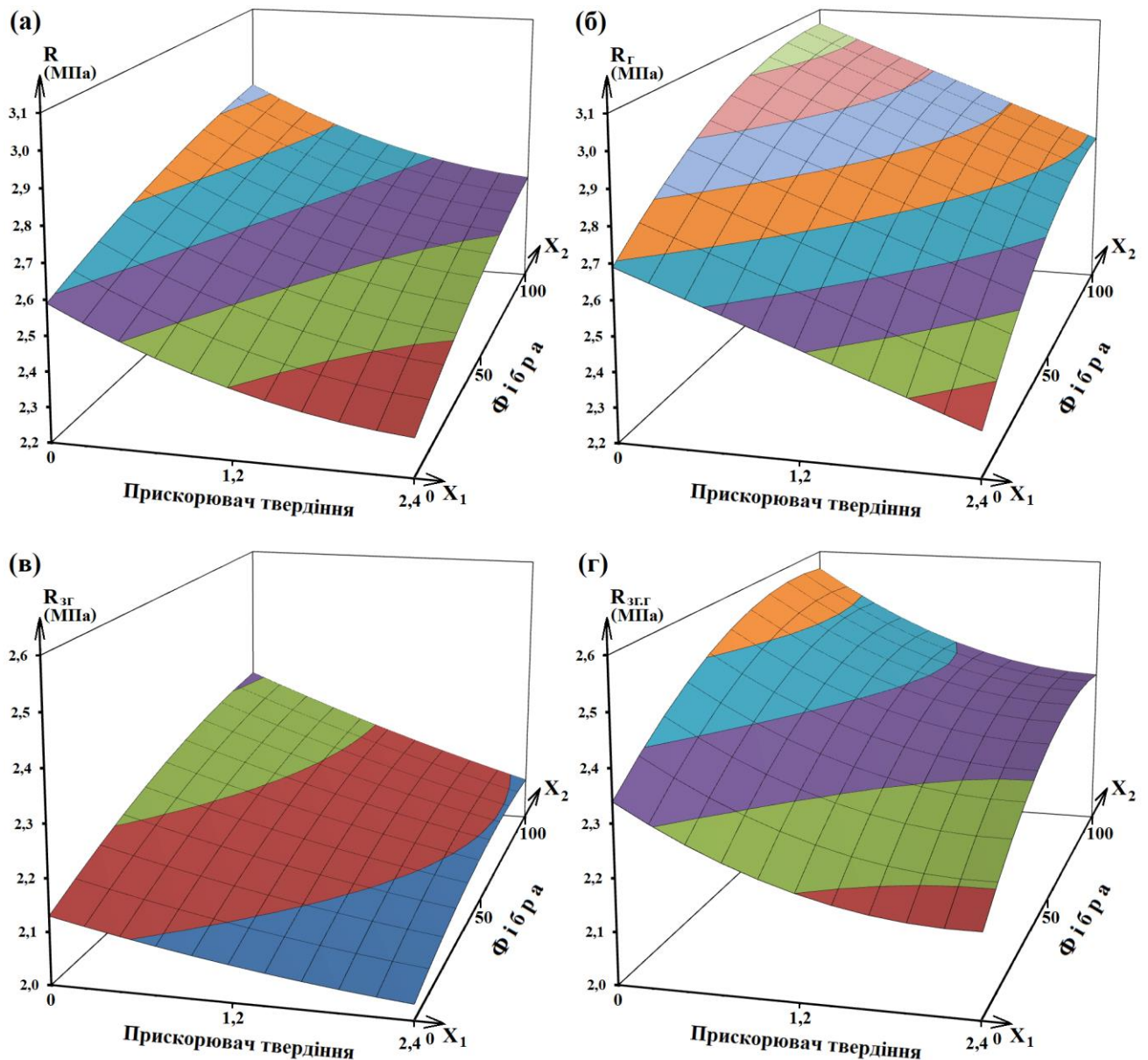


Рис.4.18 Вплив варійованих факторів складу на адгезійну міцність бетонів і фібробетонів:

- а) визначену методом відриву при змочуванні поверхні зразка;
- б) визначену методом відриву при обробці поверхні зразка ґрунтовкою;
- в) визначену методом розтягу при згині при змочуванні поверхні зразка;
- г) визначену методом розтягу при згині при обробці поверхні зразка ґрунтовкою

При використанні прискорювача твердіння SikaRapid 3 адгезійна міцність бетонів і фібробетонів знижується, що пояснюється зниженням міцності

ремонтного матеріалу у проектному віці. Проте як видно з діаграм на рис.4.18 це зниження повністю компенсується дисперсним армуванням.

Таким чином, модифіковані бетони при їх використанні в якості ремонтних матеріалів мають досить високу адгезійну міцність до старого бетону, від 2,30 МПа при випробуванні методом відриву і від 2,05 МПа при випробуванні методом розтягу при згині. За рахунок дисперсного армування сталевую анкерною фіброю адгезійна міцність ремонтних бетонів підвищується на 7-15%. Використання прискорювача твердіння несуттєво знижує адгезійну міцність бетонів. За рахунок обробки поверхні контакту "старого" бетону ґрунтовкою адгезійна міцність додатково підвищується на 6-10%.

Тобто модифіковані фібробетони відповідають усім основним вимогам до матеріалів для ремонту жорстких дорожніх та аеродромних покриттів. Застосування таких бетонів дозволяє швидко відновлювати рух та забезпечує якісну спільну роботу ремонтного матеріалу з основою.

Висновки за 4-м розділом

1. Досліджено вплив кількості добавки прискорювача твердіння Sika Rapid 3 і сталеві анкерної фібри на властивості бетонів для влаштування та глибинного ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

2. Кількість прискорювача твердіння несуттєво впливає на В/Ц сумішей рівної рухомості П2, а застосування фібри вимагає підвищення В/Ц для збереження необхідної рухомості. За рахунок використання раціональної кількості суперпластифікатора полікарбоксилатного типу MasterGlenium SKY 608 (1,2% від маси цементу) В/Ц всіх досліджених сумішей знаходилося в межах від 0,309 до 0,343.

3. Використання прискорювача твердіння суттєво підвищує ранню міцність бетонів на стиск і на розтяг при згині. У віці 2-х діб за рахунок використання добавки Sika Rapid 3 у кількості 1,8-2,4% міцність на стиск бетонів зростає на 9 МПа і більше, міцність на розтяг при згині на 0,6..0,7 МПа.

У проектному 28-ми денному віці бетони і фібробетони з прискорювачем твердіння характеризуються дещо меншою міцністю у порівнянні з аналогічними складами без добавки Sika Rapid 3.

4. За рахунок використання металевої анкерної фібри рання міцність бетонів на стиск зростає на 3..5 МПа, проектна міцність на стиск – на 7..10 МПа. Найбільш суттєво дисперсне армування підвищує міцність бетонів на розтяг при згині – з 5,6..6,1 МПа до 8,5..9,3 МПа у віці 2-х діб і з 7..8,5 МПа до 15,5..17,5 МПа у віці 28-мі діб.

5. Фібробетони з кількістю прискорювача твердіння від 1,4% і фібри від 50 кг/м^3 у віці 2-х діб мають міцність на стиск 55 МПа і більше. При використанні максимальної кількості дисперсної арматури та добавки Sika Rapid 3 рання міцність фібробетонів становить не менше 60 МПа, що дозволяє починати експлуатацію практично для всіх типів покриттів автодоріг і аеродромів.

6. Використання сталеві фібри підвищує морозостійкість бетону на 30..35% та знижує його стиранисть. Дисперсно-армовані бетони незалежно від кількості прискорювача твердіння мають морозостійкість F200 що є достатнім рівнем згідно ДСТУ 8858:2019. При застосуванні прискорювача твердіння за умови відсутності дисперсного армування морозостійкість матеріалу знижується в середньому на 50 циклів а стиранисть підвищується на $0,04 \text{ г/см}^2$. Незалежно від кількості прискорювача твердіння модифіковані суперпластифікатором MasterGlenium SKY 608 фібробетони з кількістю сталеві фібри від 40 кг/м^3 характеризуються високою морозостійкістю і зносостійкістю ($G < 0,25 \text{ г/см}^2$), що забезпечують достатню довговічність матеріалу для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

7. За рахунок використання раціональної кількості анкерної сталеві фібри ($40..85 \text{ кг/м}^3$) і прискорювача твердіння усадка бетонів знижується на 18..20%. Після 7 діб твердіння у повітряно-сухих умовах усадка фібробетону з

прискорювачем становить $1,29 \times 10^{-4}$, а бетону без фібри і прискорювача – $1,60 \times 10^{-4}$. Гранична усадка бетонів складає не більше $\varepsilon \approx 2,5 \times 10^{-4}$ (0,25 мм/м).

8. Дисперсне армування відчутно підвищує адгезійну міцність бетонів при їх використанні як ремонтних. При введенні фібри у кількості 50 кг/м^3 величина визначеної різними методами адгезії підвищується на 0,16..0,19 МПа (7..9%), при використанні 100 кг/м^3 – на 0,24..0,36 МПа (11..15%). При використанні прискорювача твердіння адгезійна міцність бетонів і фібробетонів знижується на 5..10%, що пояснюється зниженням міцності матеріалу у проектному віці. Максимальна визначена методом відриву адгезійна міцність фібробетонів без використання ґрунтовки складає 2,8 МПа, при обробці поверхні контакту ґрунтовкою ІЗОГРУНТ – 3 МПа.

9. Розроблені модифіковані фібробетони відповідають усім основним вимогам до матеріалів для влаштування і ремонту жорстких дорожніх та аеродромних покриттів. Застосування таких фібробетонів дозволяє швидко відкривати або відновлювати рух та забезпечує якісну спільну роботу ремонтного матеріалу з основою.

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Вибір оптимальних складів фібробетону для ремонту і влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів

На ділянці дороги після її ремонту або в разі будівництва з відповідними вимогами щодо термінів початку експлуатації можливість швидкого відкриття руху при забезпеченні необхідних для цього показників міцності та довговічності є найважливішими вимогами до застосованих бетонів і фібробетонів. Для задоволення цих вимог можуть активно використовуватись розроблені швидкотвердіючі сталеві фібробетони. Для повноцінного відкриття руху автомобільного транспорту або повітряних суден ремонтний матеріал має досягати міцність на розтяг при згині у діапазоні 5-8 МПа [2, 67-69] у найкоротші терміни. При влаштуванні покриттів рання міцність є важливою як з позиції терміну початку експлуатації, так і з позиції виконання наступних технологічних операцій, наприклад нарізка швів. Необхідно підкреслити, що бетони з високою ранньою міцністю мають високі показники міцності і у проектному віці, а саме > 60 МПа, через що часто характеризуються високою хрупкістю, особливо при динамічних навантаженнях від транспорту. Дисперсне армування із застосуванням сталеві анкерної фібри дозволило суттєво підвищити ранню міцність на розтяг при згині (в середньому на 55..60 % у віці 2х діб твердіння) і на 65..85% і проектного віці, що в свою чергу забезпечує високу тріщиностійкість композиту.

Важливо відзначити, що В/Ц всіх досліджених бетонів і сталеві фібробетонів знаходилося у діапазоні 0,309..0,343, що є доволі низьким показником. Проте це не виключає впливу деформацій усадки при твердінні, які можуть негативно позначитися на показниках сумісної роботи ремонтного матеріалу з основою та подальшій довговічності ремонтного матеріалу, а також на довговічності матеріалу при його використанні для влаштування нових покриттів. Комплексне модифікування складів фібробетонів з використанням

прискорювача твердіння і дисперсного армування нівелює негативний ефект деформацій усадки досліджених бетонів. Зокрема використання дисперсного армування дозволяє підвищити ранні показники міцності досліджених фібробетонів, а кількість дисперсного армування нівелює деформації усадки попри незначне підвищення В/Ц фібробетонних сумішей.

Вибір оптимальних складів фібробетонів для ремонту і влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів здійснювався з використанням комплексу отриманих 2-х факторних ЕС-моделей, які наведені у розділі 4 та які описують вплив кількості прискорювача твердіння і металевої анкерної фібри на властивості бетону. Процедура вибору проводилася графічним методом на діаграмах типу «квадрат».

При цьому для доріг I-а категорії згідно ДБН В.2.3-4:2015 [284] (таблиця К) має використовуватися бетон класу В40 (М500), тобто С32/40, для доріг категорії I-б – В35 (М450), тобто С30/35. Також необхідно враховувати, що згідно ДСТУ-Н Б В.2.3-36:2016 [267] «Настанова з влаштування жорсткого дорожнього одягу» «...збільшення довговічності дорожнього одягу може бути забезпечено за рахунок влаштування верхнього шару з високоміцних цементобетонів проектного класу за міцністю не менше ніж В40».

Ремонтні склади мають відповідати проектним вимогам до покриття [267, 280], яке ремонтується, вже у ранньому віці, який був визначений як вік у 2 доби. Це дозволяє швидко відновлювати рух. Аналогічні високі вимоги до ранньої міцності можуть висуватися при влаштуванні покриттів з необхідністю швидкого початку експлуатації, наприклад на перехрестях. Відповідно у якості критеріїв обмеження обрано рівні таких фізико-механічних показників, важливих саме для ремонтних матеріалів і матеріалів для влаштування покриттів, що мають вводитися в експлуатацію в прискореному темпі:

- міцність на стиск у віці 2-х діб;
- міцність на розтяг при згині у віці 2-х діб;
- адгезійна міцність до старого бетону.

У якості основного критерію оптимізації обрано собівартість бетону. Також враховується зносостійкість і морозостійкість бетону як показники, що

забезпечують довговічність при подальшій експлуатації. Рівні міцності на стиск і міцності на розтяг при згині у проектному віці також контролювалися, тобто розраховувалися за відповідними ЕС-моделями.

Собівартість бетонів і фібробетонів (грн/м³) була розрахована в цінах жовтня 2021 року з врахуванням вартості приготування бетонних сумішей. За розрахунками була побудована відповідна ЕС-модель, ізолінії якої відображені на рис.5.1.

У першому варіанті вибору (рис.5.1.а) були прийняті такі рівні критеріїв обмеження: міцність на стиск у віці 2-х діб не менш 55 МПа; міцність на розтяг при згині у в 2-х діб не менш 8 МПа; адгезійна міцність до старого бетону (без обробки ґрунтовкою) не менш 2,5 МПа.

Такий фібробетон, основне використання якого передбачається в якості ремонтного, вже у віці 2х діб забезпечує більш високі показники міцності, ніж нормуються для доріг I категорії і може бути рекомендованим для найбільш завантажених ділянок доріг та аеродромних покриттів. Координати обраного складу позначені на рис.5.1.а зіркою з цифрою 1. Морозостійкість бетону даного складу F200, стиранисть 0,25 г/см², міцність на стиск у проектному віці 82 МПа, міцність на розтяг при згині у проектному віці 14,5 МПа. Собівартість такого бетону складає 4600 грн/м³.

У другому варіанті вибору (рис.5.1.б) були прийняті такі рівні критеріїв обмеження: міцність на стиск у віці 2-х діб не менш 50 МПа; міцність на розтяг при згині у в 2-х діб не менш 7 МПа; адгезійна міцність до старого бетону (без обробки ґрунтовкою) не менш 2,4 МПа. Такий фібробетон, основне використання якого передбачається в якості ремонтного, але може бути рекомендовано і для влаштування покриттів, вже у віці 2х діб забезпечує міцність, що нормуються для доріг I категорії. Було обрано два конкуруючих склади, координати яких позначені на рис.5.1.б зірками з цифрами 2 і 3. Склад №3 характеризується мінімальною собівартістю, склад №2 – при незначно більшій собівартості характеризується кращою зносостійкістю та міцністю у проектному віці.

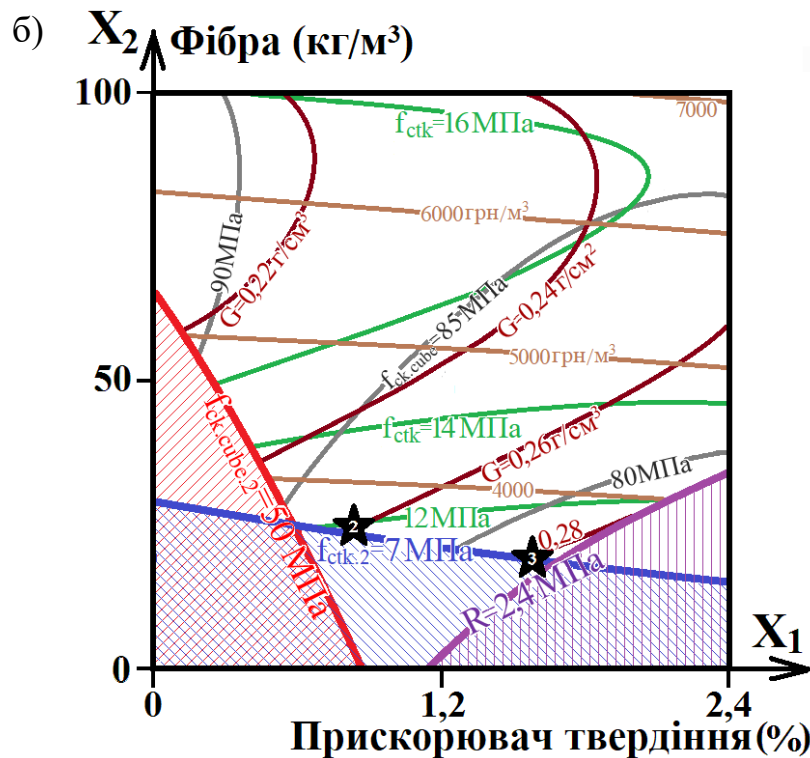
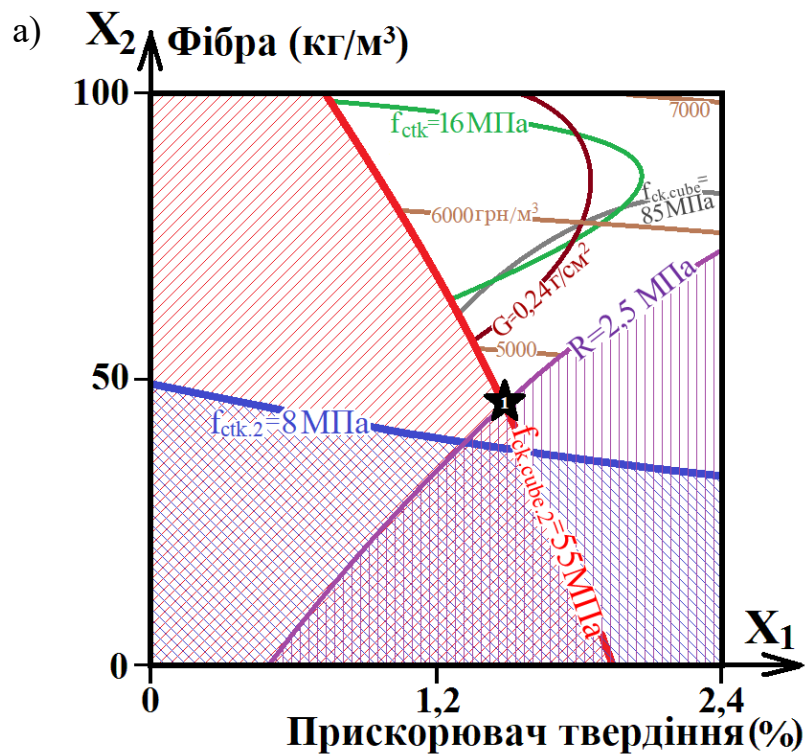


Рис.5.1 Вибір оптимальних складів фібробетонів для ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів:

а – з ранньою міцністю на стиск 55 МПа і на розтяг при згині 8 МПа

б – з ранньою міцністю на стиск 50 МПа і на розтяг при згині 7 МПа

Морозостійкість бетону складу №2 F200, стиранисть $0,26 \text{ г/см}^2$, міцність на стиск у проектному віці $82,5 \text{ МПа}$, міцність на розтяг при згині у проектному віці 12 МПа , собівартість 3700 грн/м^3 .

Морозостійкість бетону складу №3 F200, стиранисть $0,28 \text{ г/см}^2$, міцність на стиск у проектному віці $78,5 \text{ МПа}$, міцність на розтяг при згині у проектному віці 11 МПа , собівартість 3600 грн/м^3 .

Обрані оптимальні склади бетонів та фізико-механічні характеристики бетонів цих складів наведені у таблиці 5.1.

Важливо також відзначити той факт, що оптимальний склад фібробетонної суміші і фібробетону на її основі для ремонту покриття може бути визначено лише після комплексного обстеження ремонтної ділянки [281, 282]. На основі отриманих даних і місцевих будівельних норм, склади ремонтних сталевібробетонів будуть коригуватися в залежності від вимог проекту на ремонтно-відновлювальні роботи, а саме: фізико-механічних показників щодо ремонтного матеріалу, термінів проведення ремонтно-відновлювальних робіт, кваліфікації виконавців та умови проведення цих робіт.

При влаштуванні жорстких дорожніх і аеродромних покриттів без висування вимог щодо більш швидкого введення в експлуатацію, використання прискорювача твердіння в складі бетонів є недоцільним. Кількість сталеві анкерної фібри, яку рекомендується застосовувати, залежить від необхідного ступеню підвищення проектної міцності бетону на розтяг при згині та на стиск. Наприклад при використанні анкерної фібри у кількості 45 кг/м^3 (без використання прискорювача) досягається міцність на стиск $f_{\text{ck.cube}} = 90 \text{ МПа}$ і міцність на розтяг при згині $f_{\text{ctk}} = 16 \text{ МПа}$. Собівартість такого бетону складає 4550 грн/м^3 . При зниженні кількості фібри до 20 кг/м^3 фібробетон має міцність на стиск $f_{\text{ck.cube}} = 86 \text{ МПа}$ і міцність на розтяг при згині $f_{\text{ctk}} = 12 \text{ МПа}$, але собівартість матеріалу при цьому складає 3300 грн/м^3 . Також склади з фіброю характеризуються кращою зносостійкістю. Так при використанні анкерної фібри у кількості 45 кг/м^3 рівень стираниості $G \approx 0,23 \text{ г/см}^2$, при використанні 20 кг/м^3 – $G \approx 0,25 \text{ г/см}^2$.

Обрані оптимальні склади фібробетонів для ремонту і влаштування
жорстких покриттів та їх фізико-механічні характеристики

№ складу	Склад бетону	Фізико-механічні характеристики
№1	Цемент – 400 кг/м ³ Щебінь – 1180 кг/м ³ Пісок – 787 кг/м ³ Добавка MasterGlenium SKY 608 – 4,8 кг/м ³ Добавка Sika Rapid 3 – 5,7 кг/м ³ Сталева фібра – 47 кг/м ³ Вода – 130 л/м ³	Міцність на стиск у віці 2х діб $f_{ck.cube.2} = 55$ МПа Міцність на розтяг при згині у віці 2х діб $f_{ctk.2} = 8,4$ МПа Міцність на стиск $f_{ck.cube} = 82,5$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{ctk} = 14,5$ МПа Адгезійна міцність $R = 2,5$ МПа Морозостійкість F200 Стираність $G = 0,25$ г/см ²
№2	Цемент – 400 кг/м ³ Щебінь – 1185 кг/м ³ Пісок – 804 кг/м ³ Добавка MasterGlenium SKY 608 – 4,8 кг/м ³ Добавка Sika Rapid 3 – 3,8 кг/м ³ Сталева фібра – 25 кг/м ³ Вода – 128 л/м ³	Міцність на стиск у віці 2х діб $f_{ck.cube.2} = 51$ МПа Міцність на розтяг при згині у віці 2х діб $f_{ctk.2} = 7$ МПа Міцність на стиск $f_{ck.cube} = 82$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{ctk} = 12$ МПа Адгезійна міцність $R = 2,48$ МПа Морозостійкість F200 Стираність $G = 0,26$ г/см ²
№3	Цемент – 400 кг/м ³ Щебінь – 1186 кг/м ³ Пісок – 806 кг/м ³ Добавка MasterGlenium SKY 608 – 4,8 кг/м ³ Добавка Sika Rapid 3 – 6,0 кг/м ³ Сталева фібра – 20 кг/м ³ Вода – 126 л/м ³	Міцність на стиск у віці 2х діб $f_{ck.cube.2} = 54$ МПа Міцність на розтяг при згині у віці 2х діб $f_{ctk.2} = 7$ МПа Міцність на стиск $f_{ck.cube} = 78,5$ МПа Міцність на розтяг при згині $f_{ctk} = 11$ МПа Адгезійна міцність $R = 2,4$ МПа Морозостійкість F200 Стираність $G = 0,28$ г/см ²

5.2 Технології приготування і застосування швидкотвердіючого сталевібробетону для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг і аеродромів

В рамках даної дисертаційної роботи були отримані сталевібробетони з високими показниками міцності і довговічності, які рекомендується використовувати як ремонтні. Також були розроблені ефективні технологічні прийоми для застосування отриманих складів дисперсно-армованих бетонів при необхідності швидкого ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

На базі ОДАБА був розроблений регламент з технології приготування і застосування швидкотвердіючого сталевібробетону для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг та аеродромів, який затверджений у ТОВ «БАУТЕХ-Україна» (додаток Б).

Отриманий комплекс ЕС-моделей (розділ 4) дозволив оптимізувати склади швидкотвердіючих вібробетонів, які рекомендовано для використання у якості ремонтних, з використанням оптимальної кількості сталевіброанкерної фібри і прискорювача твердіння SikaRapid 3 (п.5.1). Для досягнення легкоукладальності S2 використовувався суперпластифікатор BASF MasterGlenium SKY 608. Рухомість вібробетонної суміші S2 обрана з метою застосування віброущільнювачів для забезпечення захисного шару бетону.

В якості в'язучого для виготовлення ремонтних швидкотвердіючих сталевібробетонів необхідно використовувати цементи ПЦ I або ПЦ II/A-III (з домішками меленого шлаку не більше 20%). Марка в'язучого повинна бути не менше М500, клас міцності на стиск не менше ніж 42,5 за ДСТУ Б В.2.7-46 «Цементи загальнобудівельного призначення» та ДСТУ Б EN 197-1 «Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів». Максимальний вміст цементу на 1 м³ бетонної суміші не має перевищувати 480 кг/м³. Мінімальний вміст цементу має бути не меншим 300 кг/м³.

В якості крупного заповнювача для приготування ремонтних швидкотвердіючих сталевібробетонів необхідно використовувати щебінь із щільних гірських порід з середньою густиною $2000-3000 \text{ кг/м}^3$, який повинен задовольняти вимогам ДСТУ Б В.2.7-75-98 «Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт» і ДСТУ 8858:2019 «Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови». Найбільша крупність заповнювача для бетонів, що використовуються для глибинного ремонту, повинна бути не більше 20 мм. Морозостійкість крупного заповнювача повинна бути не менше марки F200. Випробування щебеню здійснюється згідно ДСТУ Б В.2.7-71-98 «Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань».

В якості дрібного заповнювача для ремонтних швидкотвердіючих сталевібробетонів необхідно використовувати природні кварцові піски або піски з відсіву подрібнених гірських порід з середньою густиною зерен $2000-3000 \text{ кг/м}^3$. Пісок повинен задовольняти вимогам ДСТУ Б В.2.7-32 «Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт», ДСТУ Б В.2.7-210 «Будівельні матеріали. Пісок із відсіву дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови», ДСТУ Б В.2.7-76 «Пісок для будівельних порід із відсіву дроблення скельних гірських порід гірничо-збагачувальних комбінатів України. Технічні умови». Для забезпечення морозостійкості бетону вміст мулистих та глинистих домішок у піску має бути не більше 1%. Випробування піску здійснюється згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 «Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань». Зберігання піску має здійснюватися згідно ДСТУ Б В.2.7.-32-95 «Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт».

Для покращення міцності на розтяг при згині, морозостійкості, зносостійкості, тріщиностійкості та ударостійкості швидкотвердіючих сталевібробетонів для глибинного ремонту жорстких покриттів доріг і

аеродромів в склад сумішей вводиться сталева анкерна фібра з довжиною волокон 50 мм і діаметром 1 мм (виробництва ПАТ «Стальканат Сілур», м. Одеса), яка відповідає вимогам EN 14889-1:2006 «Fibres for concrete Steel fibres. Definitions, specifications and conformity», або аналогічна за фізико-механічними властивостями і геометричними параметрами фібра. Важливим етапом є чітке дозування сталеві анкерної фібри і ретельне її перемішування з заповнювачами. Рекомендується додавати сталеву фібри у 2-4 підходи для уникнення утворення «їжаків».

Для збереження заданої легкоукладальності фібробетонних сумішей і підвищення її фізико-механічних властивостей суміш модифікується суперпластифікатором полікарбоксилатного типу Master Glenium SKY 608, який відповідає вимогам ДСТУ EN 934-2:2019 «Добавки для бетонів та будівельних розчинів. Загальні технічні умови Частина 2. Добавки до бетонів. Визначення, вимоги, відповідність маркування, етикетування (EN 934-2:2009 + A1:2012, IDT)».

Для підвищення ранньої міцності на стиск і розтяг при згині модифікованих ремонтних сталеві фібробетонів для жорстких покриттів автомобільних доріг і аеродромів в склад сумішей вводиться прискорювач твердіння SikaRapid 3 – безхлоридний прискорювач твердіння, що особливо важливо при використанні сталеві фібри.

Для приготування ремонтних сталеві фібробетонів для жорстких покриттів автомобільних доріг і аеродромів слід застосовувати воду, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011 «Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови».

Приготування сумішей швидкотвердіючих сталеві фібробетонів для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг і аеродромів необхідно здійснювати у бетонозмішувачах примусового типу.

Дозування всіх компонентів для приготування ремонтних фібробетонів необхідно проводити по масі. Відхилення фактичного дозування від заданої величини не повинно перевищувати: для цементу, води, фібри і добавки $\pm 1,0\%$, для заповнювачів (піску і щебеню) $\pm 2,0\%$.

При виготовленні ремонтних фібробетонів для жорстких дорожніх і аеродромних покриттів з метою рівномірного розподілу сталевих фібри у суміші завантаження компонентів у бетонозмішувач слід проводити в наступній послідовності: щебінь, фібра, пісок. Далі у суміш додається цемент, далі вода з введеними до неї добавками. Після подачі води слід перемішувати фібробетонну суміш не менше 3 хвилин.

Максимальний припустимий час транспортування і витримки суміші швидкотвердіючого сталевих фібробетону до її укладання не має перевищувати 45 хвилин внаслідок зменшення рухомості суміші і погіршення умов її укладання. Додавання води в бетонну суміш в період її транспортування і укладання забороняється.

При великих обсягах робіт (більше $0,5 \text{ м}^3$), для транспортування суміші сталевих фібробетону для ремонту жорстких покриттів автомобільних доріг і аеродромів від місця приготування до місця укладання рекомендується використовувати авто-бетонозмішувачі (бетоновози). Порухення однорідності і заданої рухливості бетонної суміші при її транспортуванні не допускається. При невеликих обсягах робіт (до $0,5 \text{ м}^3$), рекомендується виготовляти ремонтну суміш на місці проведення робіт.

Для ущільнення фібробетонної суміші рекомендується використовувати поверхневі вібратори або віброрейки з частотою коливань 50-120 Гц (3000-7000 кол./хв.). Момент закінчення вібрації визначається по появі на поверхні свіжоукладеного фібробетону цементного молока і по припиненню виділення з бетонної суміші пухирців повітря.

Окрім вищеописаних етапів по виготовленню і укладанню ремонтного сталевих фібробетону, важливим етапом є забезпечення належного догляду за бетоном.

Для створення сприятливих умов набору міцності швидкотвердіючого сталевих фібробетону для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг і аеродромів слід вжити заходи, що оберігають його від втрати вологи, зокрема під впливом вітру та безпосередньої дії сонця. При великих обсягах робіт

(більше 25 м²) відремонтовані ділянки одразу після укладання і ущільнення ремонтного матеріалу необхідно обробляти мембраноутворювачами (дисперсіями полімерів) для запобігання втрати вологи. Для обробки можуть використовуватись мембраноутворювачі Bauseal Standart, Marecure S або аналогічні за принципом дії. При невеликих обсягах робіт (менше 25 м²), поверхню відремонтованого покриття після укладання і ущільнення слід накрити плівкою чи мішковиною (використання мембраноутворювачів також можливо).

При влаштуванні покриттів в сухих спекотних умовах (температура повітря вище 26°C, вологість нижче 80%) обробка водною дисперсією полімерів є обов'язковою.

Наведені у регламенті рецептури та технологічні прийоми гарантують забезпечення високої якості ремонтного покриття. Крім забезпечення високої ранньої міцності на стиск і розтяг при згині, виконуються всі умови (забезпечуються рівні необхідних фізико-механічних властивостей) щодо довговічності дорожнього бетону.

Висока морозостійкість (не нижче F200), низька стиранисть (не більше 0,3 г/см²) позитивно впливають при несприятливій дії природно-кліматичних факторів, особливо у осінньо-весняний період. Висока адгезія (більше 2 МПа) забезпечується за рахунок високої міцності композита і низької усадки, що особливо важливо для ремонтних матеріалів. При необхідності підвищення адгезії до старого бетону більше 2,5 МПа рекомендується використовувати ґрунтовки глибокого проникнення.

Виготовлення швидкотвердіючого сталевібробетону для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг і аеродромів згідно регламенту відповідає санітарним нормам проектування, вимогам про безпеку проведення ремонтних робіт та вимогам охорони природи.

Обов'язковим є контроль ранньої міцності на розтяг при згині у віці двох діб, який необхідно виконувати у акредитованих лабораторіях відповідно діючих стандартів якості.

Також результати експериментальних досліджень дисертації впроваджені у науковий процес ОДАБА. Отримані дані використовувалися у методичних матеріалах освітніх компонентів «Будівництво та реконструкція автомобільних доріг та штучних споруд» і «Ресурсозбереження та новітні технології у будівництві автомобільних доріг та аеродромів», а також при підготовці дипломних робіт магістрів освітньо-професійної програми «Автомобільні дороги і аеродроми» підготовки магістрів спеціальність 192 - Будівництво та цивільна інженерія. Довідка про впровадження результатів наведена у додатку В.

Висновки за 5-м розділом

1. З використанням комплексу отриманих ЕС-моделей та з врахуванням адгезії до старого бетону і собівартості обрано оптимальні склади фібробетонів для глибинного ремонту та влаштування дорожніх і аеродромних покриттів, які мають високу ранню міцність та забезпечують необхідну довговічність в типових умовах експлуатації. Для влаштування жорстких покриттів без висування вимог щодо більш швидкого введення в експлуатацію рекомендовано склади фібробетонів без прискорювача твердіння.

2. Результати досліджень впроваджено у виробництві. Розроблено «Регламент з технології приготування і застосування швидкотвердіючого сталеві фібробетону для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг і аеродромів», який затверджений у ТОВ «БАУТЕХ-Україна».

3. Результати досліджень використовуються в освітньому процесі Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів за освітньою програмою «Автомобільні доріги та аеродроми».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За рахунок використання сталеві анкерної фібри, суперпластифікатора і прискорювача твердіння отримано високоміцні швидкотердіючі бетони для ремонту і влаштування жорстких дорожніх та аеродромних покриттів з забезпеченою довговічністю.

2. Порівняно властивості не модифікованих бетонів на різних видах цементів. Встановлено, що бетони на основі ПЦ-П/А-П-500 Р-Н і ПЦ П/А-Ш-500 мають вищу ранню міцність та достатню морозостійкість. З врахування ситуації на ринку у якості основного в'язучого для дорожніх бетонів обрано портландцемент ПЦ П/А-Ш-500.

3. Визначено вплив суперпластифікатора полікарбоксиласного типу BASF MasterGlenium SKY на міцність і структуру бетонів на цементах ПЦ П/А-Ш-500 і ПЦЦ IV/А-500, встановлена раціональна кількість добавки. Рентгенофазовий аналіз підтвердив позитивну роль полікарбоксилатної добавки при структуроутворенні бетону. На основі портландцементу ПЦ П/А-Ш-500 отримано бетон міцністю 85,6 МПа з міцністю у віці 3х діб 64,1 МПа. На основі цементу ПЦЦ IV/А-500 Р отримано дорожній бетон міцністю 69,9 МПа з міцністю у віці 3х діб 37,0 МПа.

4. Визначено вплив метакаоліну на властивості модифікованого добавкою MasterGlenium SKY 608 бетону. Встановлено, що заміна частини цементу метакаоліном не викликає покращення фізико-механічних характеристик бетонів при зростанні усадки матеріалу завдяки підвищенню В/Ц. З врахуванням ринкової вартості метакаоліну застосування цього додаткового компоненту в бетонах дорожніх покриттів не є доцільним.

5. З використанням методів планування експерименту досліджено вплив добавки прискорювача твердіння Sika Rapid 3 і сталеві анкерної фібри на властивості бетонів для влаштування і глибинного ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів. Застосування фібри вимагає підвищення В/Ц для збереження необхідної рухомості суміші П2. За рахунок використання

раціональної кількості суперпластифікатора MasterGlenium SKY 608 В/Ц сумішей знаходилося в межах від 0,309 до 0,343.

6. Використання прискорювача твердіння Sika Rapid 3 суттєво підвищує міцність бетонів на стиск і на розтяг при згині у віці 2х діб, на 9 МПа і 0,7 МПа відповідно. У проектному віці міцність бетонів і фібробетонів при використанні прискорювача твердіння дещо зменшується. За рахунок застосування сталеві анкерної фібри рання міцність бетонів на стиск зростає на 3-5 МПа (7-9%), на розтяг при згині – на 3,0-3,4 МПа (35-50%). У проектному віці дисперсне армування підвищує міцність на стиск на 7-10 МПа (8-11%), міцність на розтяг при згині на 7,5-8 МПа (80-100%). Фібробетони з кількістю прискорювача твердіння від 1% і фібри від 35 кг/м³ мають міцність на стиск у віці 2-х діб не менш 50 МПа, що дозволяє починати експлуатацію практично для всіх типів покриттів автодоріг і аеродромів.

7. Використання сталеві фібри підвищує морозостійкість бетонів та на 30-35% знижує їх стиранисть. Дисперсно-армовані бетони з кількістю сталеві фібри від 50 кг/м³ незалежно від кількості прискорювача твердіння мають морозостійкість F200 і стиранисть $G < 0,25$ г/см², що забезпечує достатню довговічність жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

8. Дисперсне армування підвищує визначену різними методами адгезійну міцність бетонів жорстких покриттів на 7-15%. Максимальна визначена методом відриву адгезійна міцність фібробетонів без використання ґрунтовки складає 2,8 МПа, при обробці поверхні контакту ґрунтовкою ІЗОГРУНТ – 3 МПа. Гранична усадка бетонів не перевищує 0,25 мм/м, за рахунок використання фібри і прискорювача твердіння усадка знижується на 18..20%.

9. З врахуванням собівартості обрано оптимальні склади фібробетонів для ремонту та влаштування жорстких дорожніх і аеродромних покриттів, які мають високу ранню міцність та забезпечують необхідну довговічність в типових умовах експлуатації.

10. Результати досліджень впроваджено у виробництві. Розроблений регламент з технології приготування і застосування швидкотвердіючого

сталефібробетону для глибинного ремонту жорстких покриттів автодоріг і аеродромів, який затверджений у ТОВ «БАУТЄХ-Україна». Результати досліджень також використовуються в освітньому процесі Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів за освітньою програмою «Автомобільні дорogi та аеродроми».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Офіційний сайт державного агентства автомобільних доріг України: веб-сайт. URL: <https://ukravtodor.gov.ua>. (дата звернення 13.03.2021).
2. Iqrar Hussain, Babar Ali, Tauqeer Akhtar, Muhhamad Sohail Jameel, Syed Safdar Raza. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass and polypropylene). *Case studies in construction materials*, 2020. P. 1-10.
3. Majid Jaral, Er Suhaib Firdous. A review study on the steel fiber reinforced concrete pavement. *International journal of scientific development and research*. 2018. Vol. 3. Issue 4. P. 311-313.
4. Zainab A. Al-Kaissi, Ahmed Saheb Daib, Rusul Raed Abdull-Hussain. Experimental and numerical analysis of steel fiber reinforced concrete pavement. *Journal of engineering and sustainable development*. 2016. Vol. 20 P. 135-155.
5. Eva Azhra Latifa, Robby Aguswari, Puspito Hadi Wardoyo. Performance of steel fiber concrete as rigid pavement. *Advanced materials and research*. 2013. Vol. 723 P. 452-458.
6. Дробишинець С. Я., Киричук М. В. Перспективи використання сталевібробетону в дорожньому будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2017. № 6. С. 90-98.
7. W. A. Elsaigh, E. P. Kearsley, J. M. Robberts. Steel fibre reinforced concrete for road pavement applications. *Proceedings of the 24th Southern African transport conference*. 2005. P. 191-201.
8. Jonas Carsward. Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self-compacting concrete overlays. Test methods and theoretical modelling. Doctoral thesis. Lulea Tekniska Universitet, 2006. 250 p.
9. Raymond S. Rollings. Field performance of fiber-reinforced concrete airfield pavements, Report № WES TR GL-86-11. US army engineer waterways experiment station geotechnical laboratory, 1986. 50 p.

10. Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М. Досвід застосування фібробетону у будівництві. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту*. 2014. № 24. С. 5-10.
11. Tian Sing, Trevor Nyan. Steel fibre concrete pavements: thinner and more durable. *Concrete in Australia*. 2018. P. 29-36.
12. Бабич Є. М., Андрійчук О. В., Ужегов С. О., Шаповал І. В. Застосування сталевібробетону в дорожньому будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2015. № 4. С. 3-9.
13. Лесовик Р. В., Ракитченко К. С., Казлитин С. А. Мелкозернистый фибробетон на основе техногенного песка. *Сухие строительные смеси*. 2014. № 3. С. 24-25.
14. Sun Punurai, Wonsiri Punurai, Cheng-Tzu Thomas Hsu. A very early strength concrete for highway construction. *Journal of testing and evaluation*. 2018. Vol. 35. № 6. P. 1-9.
15. Eul-Burn Lee, Kunhee Choi. Fast-track construction for concrete pavement rehabilitation. *Transportation research record*. 2006. P. 1-10.
16. Brett Ozolin, Stephen T. Muench. Rapid pavement construction tools, materials and methods. Department of civil and environmental engineering university of Washington, 1986. 50 p.
17. Kamran M. Nemati. Accelerated construction of urban intersections with Portland cement concrete pavement. *Case studies in construction materials*. 2021. Vol. 14. e00499.
18. Donald W. Lucas. Accelerated highway construction. Workshop series summary. Transportation research circular, 2003. 72 p.
19. Serhan Secmen, James Schwarz, Stuart Anderson, Dan Zollinger. Accelerated construction methodology for concrete pavements at urban intersections, Report № 1454-1F. Texas transportation institute, 1996. 204 p.
20. Constantia Achilleos, Diofantos Hadjimistis, Kyriacos Neocleous, Kypros Pilakoutas, Pavlos O. Neophytou, Stelios Kallis. Proportioning of steel fibre

reinforced concrete mixes for pavement construction and their impact on environment and cost. *Sustainability*. 2011. P. 965-983.

21. Kyriacos Neocleous, Kypros Pilakoutas, Angela Graeff, Kostas Koutselas. Steel fibre reinforced roller-compacted pavements: research and practical experience. *Second international conference on best practices for concrete pavements*. 2011. P. 1-12.

22. AC (Advisory Circular) 150/5370-16. «Rapid construction of rigid (portland cement concrete) airfield pavements» U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. Date Issued August 28, 2007. URL: https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5370-16. (дата звернення 18.10.2019)

23. Jun Murakoshi, Naoki Yanadori, Hironori Ishii. Research on steel fiber reinforced concrete pavement for orthotropic steel deck as a countermeasure for fatigue. *Stress and strain conference*. Amsterdam, 2008.

24. Вострецов Ф.И. Директор ООО «НПК «ВОЛБЕК ПЛЮС»: веб-сайт URL: <http://wolwekplus.ru/>. (дата звернення 10.06.2021).

25. Pasquale Colonna, Vittorio Ranieri. Maintenance and repair of airfield apron rigid pavements. *Transportation research journal of the transportation research board*. 2002. P. 1-10.

26. Zhao Zhiqin, Ma Qingma, Xu Qian, Sun Feng. A review: fast repair technology of cement concrete pavement. *E3S web of conferences* 136, 04053, 2019. P. 1-4.

27. Xiaoqing Yu, Mao Lin, Guanglong Geng, Li J, Na Wei. Steel fiber reinforced concrete pavement maintenance. *Applied mechanics and materials*. 2013. Vol. 252. P. 276-279.

28. Dong hyun Kim, Manuel Trevino, David P. Whitney, David W., Raissa Ferron Fowler. Materials selection for concrete overlays: information survey review and evaluation of existing concrete overlays in Texas, Report № 0-6590-1. Center for transportation research the University of Texas at Austin, 2010. 124 p.

29. G. Ghanvillard, P.-C. Aitcin, C. Lupien. Field evaluation of steel fiber reinforced concrete overlay with various bonding mechanisms. *International symposium on recent developments in concrete fiber composites*. 1989. P. 48-56.
30. 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.
31. C. J. Arnold. Steel-fiber reinforced concrete overlay, Report № R-878. Michigan state highway commission, 1973. 5 p.
32. Chee Keong Lau, Amin Chegenizadeh, Trevor N. S. Htut, Hamid Nikraz. Performance of the steel fibre reinforced rigid concrete pavement in fatigue. *Buildings*. 2020. Vol. 10. 186
33. 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.
34. СТО Нострой 2.25.219-2018. Автомобильные дороги. Устройство и капитальный ремонт сборных цементобетонных покрытий. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ. М.: 2018. 124 с.
35. Ушаков В. В. Ремонт цементобетонных покрытий автомобильных дорог, Выпуск 6. М.: Информавтодор, 2002. 46 с.
36. Eric J. Hawn. Airfield Maintenance & Repair: A Decision-Maker`s Guide. University of Washington, 2003. 39 p.
37. Michael J. O`Donnel. FAA AC №150/5380-6C Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements. Date issued 10.10.2014. 48 p. URL: https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentnumber/150_5380-6 (дата звернення 10.10.2019)
38. Справочная энциклопедия дорожника. Том 2. Ремонт и содержание автомобильных дорог. Под ред. А. П. Васильева. М.: Информавтодор, 2004. 1129 с.

39. Возный С. П., Дорошенко Ю. М. Анализ влияния различных факторов на цементобетонное покрытие автомобильных дорог. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2016. № 96. С. 50-60.

40. Maintenance technical advisory guide: Volume II – Rigid Pavement Preservation 2nd Edition. Caltrans Division of Maintenance, 2008. 224 p. URL: <https://dot.ca.gov/programs/maintenance/pavement/mtag/mtag-rigid> (дата звернення 21.01.2019)

41. 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.

42. Лешицкая Т. П., Попов В. А. Современные методы ремонта аэродромных покрытий. М.: Ротапринт МАДИ, 1999. 131 с.

43. Youn Su Jung, Thomas J. Freeman, Dan G. Zollinger. Guidelines for Routine Maintenance of Concrete Pavement, Report № FHWA/TX-08/0-5821-1. Texas Department of Transportation, 2008. 146 p.

44. Кульчицкий В. А., Макагонов В. А., Васильев Н. Б., Чеков А. Н., Романков Н. И. Аэродромные покрытия. Современный взгляд. М.: Физико-математическая литература, 2002. 528 с.

45. Мозговий В. В., Бесараб О. М., Каськів В. І. Проектування капітального ремонту дорожніх одягів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2010. № 79. С. 50-63.

46. Радковский Б. С. Цементобетонные покрытия в США - проектирование. *Автомобильные дороги*. 2015. № 3. С. 46-59.

47. Leslie Titus-Glover, Michael I. Darter. Guidelines for improving full-depth concrete repair of PCC pavements in Wisconsin, Report № WHRP-08-02. Wisconsin department of transportation, 2008. 57 p.

48. Mike Johans, John Craig. Pavement maintenance manual. Nebraska Department of Roads, 2002. 68 p.

49. Jungheum Yeon, Seongheol Choi, Soojun Ha, Moon C. Won. Guidelines for partial depth repair in continuously reinforced concrete pavement, project № 0-5549, product № 0-5549-P. Texas Tech University, 2012. 25 p.
50. Афиногенов О. П. Проектирование жестких дорожных одежд. Кемерово: Кузбассвуиздат, 2004. 227 с.
51. Авсеенко А. А., Чутков А. А. Методические указания для определения стоимости ремонта аэродромных покрытий. М.: МАДИ, 2010. 58 с.
52. Янковский Л. В. Классификация дефектов цементобетонных покрытий автомобильных дорог. *Вестник ПНИПУ*. 2012. № 1. С. 47-55.
53. John S. Miller, William Y. Bellinger. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program, Report № FHWA-HRT-13-092. Federal Highway Administration, 2014. 142 p.
54. Васильев А. П. Ремонт и содержание автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1989. 287 с.
55. Official Site of the Federal Highway Administration, Full-Depth Repairs: веб-сайт. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/full.cfm> (дата звернения 20.12.2020)
56. John P. Zaniewski, Michael S. Mamlouk. Preventive maintenance effectiveness – preventive maintenance treatments, Report № FHWA-SA-96-027. Federal Highway Administration, 1996. 190 p.
57. Pete Rahn, Allen D. Biehler, Carlos Braceras. Mechanistic-empirical pavement design guide. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008. 204 p.
58. Raymond Bassim, Mohsen Issa. Maturity-based estimates of concrete strength for Portland concrete cement pavements and patches at early age of opening to traffic. *ACI Materials journal*. 2020. P. 197-211.
59. Daniel P. Frentress, Dale Harrington. Partial-depth repairs for concrete pavements. MAP Brief 7-2. May 2011.

60. Fay O. Bloomfield, Robert Samuelson, Ronald Less, Edward J. O'Connor. Optimizing maintenance activities. Repair of concrete pavement joints, Report № FHWA-TS-80-215. Federal Highway Administration, 1980. 38 p.
61. Michael Darter. Concrete repair best practices: a series of case studies, Report № cmr-17-013, November 2017. 119 p.
62. Steven M. Cramer, Le T. Pham, Mark B. Snyder. Better Concrete Mixes for Rapid Repair in Wisconsin. Federal Highway Administration, Report № FHWA-PL-07-027. Missouri Department of Transportation, 2007. 80 p.
63. Standard specifications for highway and structure construction. Wisconsin Department of Transportation, 2019. 592 p. URL: <https://wisconsindot.gov/pages/doing-bus/eng-consultants/cnslt-rsrcs/rdwy/stnds-spec.aspx> (дата звернення: 09.12.2018)
64. Yadira A. Porras. Durable high early strength concrete. Thesis for the degree Master of Science. Kansas state university, 2018. 142 p.
65. ДСТУ Б.В.2.7-46-2010. Цементи загальнобудівельного призначення Технічні умови. К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 14 с.
66. ASTM C150/150M-20. Standard Specification for Portland cement. American Society for Testing and Materials, 2020. 10 p.
67. J. D. Grove. The fast track revolution. *Proceedings roads 96 conference*. P. 33-48.
68. T. J. Van Dam, K. R. Peterson, L. L. Sutter, A. Panguluri, J. Sytsma. Final report for early-opening-to-traffic Portland cement concrete for pavement rehabilitation. Transportation research board of the national academies, 2005. 162 p.
69. Jason L. Johnson, Dan G. Zollinger, Sungchul Yang. Guidelines for the construction of fast track concrete pavement intersections, Report № FHWA-TX-94/1385-1F. Federal Highway Administration, 1994. 152 p.
70. A. K. Yasin, R. Bayuaji, T. E. Susanto. A review in high early strength concrete and local materials potential. *IOP conf. series: materials science and engineering* 267, 012004, 2017. P. 1-10.

71. Mijia Yang, Hani Alanazi, Saeed Ahmari. Survey and literature review of fast-track PCC pavement repair processes and materials. North Dakota state university, technical report, 2013. 135 p.

72. Shayan Gholami, Jiong Hu, Yong-Rak Kim. Development of high-performance rapid patching materials for pavement repair, Report № SPR-P1 (18) M 071. Nebraska department of transportation, 2019. 63 p.

73. A. Ghazy, M. T. Bassuoni. A new repair material for concrete pavements. Building on our growth opportunities, 2015. 11 p.

74. Ivan Quezada. Investigating rapid concrete repair materials and admixtures. Dissertation for the degree of Doctor of philosophy. Utah state university, 2018. 206 p.

75. Nader Ghafoori, Meysam Najimi, Matthew Maler. High-early-strength high-performance concrete for rapid pavement repair, Report № 224-14-803. Nevada department of transportation, 2017. 188 p.

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

77. Dale Harrington, Gary Fick, Peter Taylor. Preservation and rehabilitation of urban concrete pavements using thin concrete overlays: solutions for joint deterioration in cold weather states. National concrete pavement technology center, 2014. 40 p.

78. ОДМ 218.3.028-2013. Методические рекомендации по ремонту и содержанию цементобетонных покрытий автомобильных дорог. М.: Росавтодор, 2013. 85 с.

79. Jonbi Jonbi, A. R. Tjahjani, Nuryani Tinumbia, A. M. Pattinaja, Bambang S. Haryono. Repair of rigid pavement using micro concrete material. *MATEC web of conferences* 195, 01014, 2018. P. 1-6.

80. S. Y. Choi, J. S. Park, W. T. Jung. A study on the shrinkage control of fiber reinforced concrete pavement. *The twelfth east Asia-pacific conference on structural engineering and construction*. 2011. P. 2815-2822.

81. Y. Mohammadi, H. M. Ghasemzadeh, T. B. Talari, M. A. Ghorbani. Replacing fibre reinforced concrete with bitumen asphalt in airports. *World academy of science, engineering and technology. International journal of civil and environmental engineerin.* vol. 3, № 10, 2009. P. 351-355.

82. Справочная энциклопедия дорожника. Том 1. Строительство и реконструкция автомобильных дорог / Под ред. А. П. Васильева. М.: Информавтодор, 2005. 1519 с.

83. ITEM 557.0498-11M. Cement concrete with non-chloride accelerator for full depth slab replacement. New York State Department of Transportation, 2011. 8 p.

84. Ashish Karmacharya, Shih-Ho Chao. Precast ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for fast and sustainable pavement repair. *MATEC web of conferences* 271, 01004, 2019. P. 1-6.

85. Naser Kabashi, Cene Krasniqi, Ragip Hadri, Anite Sadikah. Effect of fibre reinforced concrete and behavior in rigid pavements. *International journal of structural and civil engineering research.* Vol.7, № 1, 2018. P. 29-33.

86. Gordon K. Ray. Concrete pavement designs in five countries of Western Europe. *41st annual meeting of the highway research board.* 1962. P. 16-25.

87. 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.

88. Laszlo Gaspar. Concrete highway pavement construction in Europe. *Proceedings of the 2nd central European congress on concrete engineering.* 2006. P. 322-328.

89. Крамар Л. Я., Кудяков А. И., Трофимов Б. Я., Шулдяков К. В. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* 2017. С. 147-157.

90. Zhanping You, Chris Gilbertson, Thomas Van Dam. Identifying best practices in pavement design, materials, construction, and maintenance in wet freeze climates

similar to Michigan, Report № SPR-1666. Michigan department of transportation. 2018. 147 p.

91. Piti Sukontasukkula, Udomvit Chaisakulkietb, Pitthaya Jamsawangc, Suksun Horpibulsukd, Chai Jaturapitakkule, Prinya Chindaprasirt. Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand. *Case Studies in Construction Materials*. 2019. vol. 11. P. 1-11.

92. Ingemar Löfgren, Anette Jansson, Kent Gylltoft. Design methods for fibre-reinforced concrete: a state-of-the-art review. *Nordic Concrete Researches*. 2008. № 38, P. 21-36.

93. Cao, Y., Yu, Q., Brouwers, H. J. H. Numerical investigation of fibers effects in SFRC under dynamic tension. *The 9th International Symposium on Cement and Concrete (ISCC 2017)*. 2017. P.1-7.

94. А.В. Киянец. Исследование истираемости сталефибробетона. *Вестник ЮУрГУ*. 2018. Т.18. № 4. С. 53-57.

95. Cenk Karakurt, Ahmet Turap Arslan. Properties of concrete pavements produced with different type of fibers. *Journal of the Turkish chemical society*. 2017. Vol. 1 P. 17-24.

96. Farid Ullah, Fahim Al-Neshawy, Jouni Punkki. Early age autogenous shrinkage of fibre reinforced concrete. *Nordic Concrete Research*. 2018. P. 59-72.

97. Amreen N. Ali, Milind V. Mohod. A review on effect of fiber reinforced concrete on rigid pavement. *IJREST*. 2015. P. 222-228.

98. Толмачев Д. С. Трещиностойкие мелкозернистые цементные бетоны транспортного назначения. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Харьков. ХНУСА, 2019. 186 с.

99. Mohammed Mansour Khadhum, Mahdi Salih Essa, Khalid Safa Hashim. Effect of shape and type of steel fibre on some mechanical properties of reinforced concrete. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*. 2006. P. 1-11.

100. Naeimeh Jafarifar. Shrinkage behavior of steel-fibre-reinforced-concrete pavements. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. The University of Sheffield. 2012. 224 p.

101. Ушеров-Маршак А. В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы. 2006. № 10. С. 8-13.
102. Yu R., Spiesz P., Brouwers H. J. H. Dynamic performance of a sustainable ultra-high performance fibre reinforced concrete under high velocity projectile impact. *Internationale Baustofftagung*. 2015. P. 1-1215-1-1222.
103. Li P. P., Yu Q. L., Brouwers H. J. H. Damage mechanism of ultra-high performance fiber reinforced concrete under repeated low-velocity impact. *ISCC*. 2017. P. 1-7.
104. Li P. Impact resistant ultra-high performance fibre reinforced concrete. Technische Universiteit Eindhoven. 2019. 169 p.
105. Cao Y. Performance of layered UHPFRC under static and dynamics loads. Technische Universiteit Eindhoven. 2020. 192 p.
106. Ingrid Lande Larse, Rein Terje Thorstense. The influence of steel fibers on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: a review. *Construction and building materials*. 2020. P. 1-15.
107. Kosmatka Steven H., Wilson Michelle L. Design and control of concrete mixtures, 14th edition, Portland Cement Association. 2011. 460 p.
108. Cao Y., Yu Q. L. Effect of inclination angle on hooked end steel fiber pullout behavior in ultra-high performance concrete. *Composite structures*. 2018. P. 151-160.
109. Дворкін Л.Й. Оптимізація складу високоміцного сталевібробетону. *Строительные материалы и изделия*. 2016. № 2-3. С. 38-41.
110. Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков. Определение вклада фибры в формирование прочности сталевібробетона. *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 1 (60). С. 172-176.
111. К.В. Таланова, Н.М. Михеев. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталевібробетонных конструкций. *Ползуновский вестник*. 2011. № 1. С. 194-199.

112. 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.

113. Дворкін Л. Й., Бордюженко О. М. Технологічні властивості високоміцних фібробетонів із пластифікаторами різних типів. *Наука та будівництво*. 2018. С. 10-17.

114. Дворкін Л. Й., Бордюженко О. М. Високоміцні швидкотверднучі бетони. *Містобудування та територіальне планування. Спеціальний випуск*. 2016. С. 13-18.

115. Дворкін Л. Й., Степасюк Ю. О., Баран О. М., Механчук В. М. Швидкотверднучі розчинні композиції. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць*. 2018. Вип. 35. С. 10-17.

116. Дворкін Л. Й., Бордюженко О. М., Ковальчук Т. В. Вплив виду сталеві фібри на міцнісні властивості сталеві фібробетонів. *Будівельні матеріали та виробу*. 2017. № 1-2. С. 25-29.

117. 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.

118. Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції та модифіковані високоміцні бетони на їх основі. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Львів. Національний університет «Львівська політехніка», 2019. 186 с.

119. Кропивницька Т. П.: Лужноактивовані композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та наномодифіковані бетони на їх основі. дис. докт. техн. наук: 05.23.05 / Львів. Національний університет «Львівська політехніка», 2020. 452 с.

120. Саницький М. А., Марущак У. Д., Мазурак Т. А. Наномодифіковані портландцементні композиції з високою міцністю у ранньому віці. *Будівельні матеріали та виробу*. 2016. № 1. С. 34-37.

121. Саницький М. А., Марущак У. Д., Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі портландцементні композиції для високофункціональних бетонів. *Будівельні матеріали та виробы*. 2018. № 3-4. С. 28-31.

122. Позняк О. Р. Високофункціональні бетони з комплексними модифікаторами на основі полікарбоксилатів. *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2009. № 655. С. 224-229.

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

124. 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.

125. Мазурак Т. А. Наномодифіковані портландцементні композиції та швидкотверднучі бетони на їх основі. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Львів. Національний університет «Львівська політехніка», 2017. 213 с.

126. Uliana Marushchak, Myroslav Sanytsky, Nazar Sydor, Serhii Braichenko. Research of impact resistance of nanomodified fiber reinforced concrete. *MATEC web of conferences* 230, 03012. 2018. P. 1-7.

127. У. Д. Марущак, М. А. Саницький, Т. А. Мазурак, Ю. В. Олевич. Дослідження наномодифікованих композицій з високою ранньою міцністю. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. № 6/6. С. 50-57.

128. Приймаченко А. С., Пушкарьова К. К., Шейніч Л. О., Гедулян С. І. Вплив комплексної активної мінеральної добавки різного складу на міцність бетону. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2013. Вип. 26. С. 364-373.

129. Л. О. Шейніч, М. Г. Миколаец. Быстротвердеющие бетоны для предварительно-напряженных плит перекрытий. *Вестник Одесской*

государственной академии строительства и архитектуры. 2013. Выпуск 49. С. 290-296.

130. Приймаченко А. С. Високоміцні сульфатостійкі бетони, модифіковані алюмосилікатними добавками. дис. канд. техн. наук: 05.23.05, Київ, 2017. 147 с.

131. Шишкин А. А. Щелочные реакционные порошковые бетоны. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. С. 56-65.

132. О. О. Шишкіна, О. О. Шишкін. Дослідження впливу нанокаталізу на формування міцності реакційного порошкового бетону. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. С. 55-60.

133. О. О. Шишкін. Дослідження впливу сполук перехідних елементів на міцелярний каталіз формування міцності реакційного порошкового бетону. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. С. 60-65.

134. Щерба В. В., Шишкин А. А. Бетоны для ремонта строительных конструкций в условиях сейсмических воздействий. *Будівельні конструкції*. 2015. Вип.82. С. 392-397.

135. І. Барабаш, Л. Ксьоншкевич. Оптимізація складів високоміцного бетону на механоактивованому в'язучому з добавкою мікрокремнезему. *Вістник ТНТУ*. 2014. Том 76. № 4. С. 148-154.

136. І. В. Барабаш, Л. М. Ксьоншкевич, О. М. Крантовська. Високоміцні бетони на механоактивованому в'язучому. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2014. Вип. 149. С. 130-136.

137. Мишутин А. В., Солоненко И. П., Леонова А. В. Жесткие дорожные покрытия из цементобетона для автомобильных дорог. *Дороги и мосты*. 2018. Вип. 18. С. 119-127.

138. Мішутін А. В., Кінтя Л. Міцність фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у різному віці. *Вістник ОДАБА*. 2019. Вип. 77. С. 135-141.

139. Деревянко В. Н., Шаповалова О. В., Кондратьева Н. В., Максименко А. А. Дисперсное армирование – способ повышения прочности изделий. *Вістник ПДАБА*. 2015. Вип. 204. С. 10-19.

140. Деревянко В. Н., Кушнир Е. Г., Шаповалова О. В. Определение минимальной длины и содержания компонентов в цементно-волокнистой композиции. *Вістник ПДАБА*. 2010. №2/3. С. 52-59.

141. Деревянко В. Н., Саламаха Л. В., Кулачко Е. А., Гопайца В. А. Разработка и исследование дисперсно-армированных бетонов для производства трамвайных плит. *Вістник ПДАБА*. 2011. №9. С. 1-8.

142. Деревянко В. Н., Мартыненко Т. В., Кондратьева Н. В. Высокопрочные ремонтные растворы с базальтовыми волокнами для ремонта трамвайных плит. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения*. 2014. № 74. С. 136-140.

143. Деревянко В. Н., Мартыненко Т. В., Кондратьева Н. В. Основные проблемы при ремонте трамвайных плит. *Вістник ОДАБА*. 2014. Вип. 53. С. 136-141.

144. Деревянко В. Н., Мартыненко Т. В., Кондратьева Н. В. Модифицированные высокопрочные ремонтные растворы. *Вістник ОДАБА*. 2015. Вип. 58. С. 110-114.

145. Каприелов С. С., Чилин И. А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций. *Строительные материалы*. 2013. № 7. С. 28-30.

146. Карпенко Н. И., Травуш В. И., Каприелов С. С., Мишина А. В., Андрианов А. А., Безгодов И. М. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона. *Архитектура и строительство*. 2013. № 1. С. 106-113.

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

148. Пшінько О. М., Громова О. В. Бетони з підвищеними адгезійними властивостями для ремонту штучних транспортних споруд. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2004. Вип. 3. С. 141-145.

149. А. Н. Пшинько, Д. В. Руденко, Ю. В. Пунагина. Бетоны с высокими эксплуатационными свойствами для специальных ремонтно-восстановительных работ. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2006. Вип. 11. С. 189-192.

150. Пшінько О. М., Краснюк А. В., Громова О. В., Палій В. В. Застосування матеріалів та добавок для модифікації технологічних і експлуатаційних властивостей ремонтних составів спеціального призначення при ремонті будівель та інженерних споруд на транспорті. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2008. Вип. 24. С. 134-138.

151. Савицький М. В., Пшінько О. М., Зінкевич А. М., Лисак В. А., Зінкевич О. Г. Оцінка суцільності ремонтного покриття в початковий період твердіння. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. 2006. Вып. 37. С. 437-440.

152. Пшінько О. М., Краснюк А. В., Громова О. В. Вибір матеріалів для ремонту та відновлення бетонних та залізобетонних конструкцій транспортних споруд з урахуванням критерію сумісності. Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ: 2015. 195 с.

153. Sergio F. Brena, Scott A. Civjan, Stephanie Castine, Gercelino Ramos. Development of high-early strength concrete for accelerated bridge construction closure pour connections, Report № NETCR115. University of Massachusetts 2018. 211 p.

154. Jacek Golaszewski, Grzegorz Cygan, Malgorzata Golaszewska. Development and optimization of high early strength concrete mix design. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019. P. 1-10.

155. Yu R. Development of sustainable protective ultra-high performance fibre reinforced concrete: design, assessment and modeling. Technische Universiteit Eindhoven. 2015. 283 p.

156. Yu R., Spiesz P. R., Brouwers H. J. H. Sustainable development of an ultra-high performance fibres reinforced concrete: towards and efficient use of fibres. *HPFRCC7*. 2015. p. 53-60.

157. Mari Bøhnsdalen Eide, Jorun-Marie Hisdal. Ultra high performance fibre reinforced concrete UHPFRC – state of the art. SINTEF Building and Infrastructure. 2012. 37 p.

158. Kosmatka Steven H., Kerkhoff Beatrix, Panarese William C. Design and Control of Concrete Mixtures, 15th edition. Portland Cement Association. 2002. 358 p.

159. ДСТУ Б В.2.7-91-99 Будівельні матеріали. В'язучі мінеральні. Класифікація. К.: Мінрегіонбуд України, 1999. 14 с.

160. ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів. К.: Мінрегіонбуд України, 2015. 62 с.

161. ДСТУ EN 196-1:2019 Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2016, IDT). К.: Мінрегіонбуд України, 2019.

162. Гуняк О. М. Високоміцні бетони транспортного призначення з підвищеною довговічністю . дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Львів. Національний університет «Львівська політехніка». 2019. 159 с.

163. Брыков А.С. Гидратация портландцемента, учебное пособие. СПб.: СПбГТИ(ТУ). 2008. 30 с.

164. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительное материаловедение. М.: Инфра-Инженерия. 2013. 832 с.

165. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. М.: Мир. 1996. 560 с.

166. Ли Ф. М. Химия цемента. Пер. с англ. М.: Госстройиздат. 1961. 647 с.

167. Бутт Ю. М., Тимашев В. В. Портландцемент. М.: Стройиздат. 1974. 326 с.

168. Ратинов В. Б., Иванов Ф. М. Портландцемент. М.: Стройиздат. 1977. 220 с.

170. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны. Научное издание. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2006. 368 с.
171. Батраков В. Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы. *Строительные материалы*. 2006. № 10. С. 4-8.
172. Roar Myrdal. Accelerating admixtures for concrete. Report № SBF BK A07025, December 2007. p 35.
173. Фаликман В. Р., Сорокин Ю. В., Калашников О. О. Строительно-технические свойства особовысокопрочных быстротвердеющих бетонов. *Бетон и железобетон*. 2004. № 5. С. 5-11.
174. M. S. Shetty. Concrete technology theory and practice. S Chand & Co Lt. 2006. 656 p.
175. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Скрипник М. М. Комплексні пластифікуючі добавки для бетону на основі ефірів полікарбосилатів. *Строительные материалы и изделия. Збірник наукових праць*. 2016. №. 1. С. 38-41.
176. Т. М. Петрова, О. М. Смирнова. Современные модифицирующие добавки для производства сборного бетона и железобетона. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2010. № 4. С. 203-212.
177. Каприелов С. С., Батраков В. Г., Шейнфельд А. В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива. *Бетон и железобетон*. 1999. № 6. С. 6-10.
178. В. Н. Тарасов, Б. В. Гусев, С. Ю. Петрунин, Н. П. Короткова, А. П. Гарновесов. Оценка эффективности применения поликарбосилатных суперпластификаторов для производства бетона. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2018. № 1. С. 1-12.
179. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
180. Elzbieta Janowska-Renkas. The influence of the chemical structure of polycarboxylic superplasticizers on their effectiveness in cement pastes. *7th*

Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering. 2015. P. 575-181.

182. Тараканов О. В. Химические добавки в растворы и бетоны: моногр. О.В.Тараканов. Пенза: ПГУАС.2016. 156 с.

183. Добавки в бетон: справочное пособие / Под ред. В. С. Рамачандрана. М.: Стройиздат. 1988 г. 575 с.

184. Фаликман В.Р. Поликарбоксилат: вчера, сегодня, завтра. *Популярное бетоноведение*. 2009. № 2. С.86-90.

185. J. Dils, G. De Schutter, V. Boel. Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. *Materials and structures*. 2012. P. 673-1683.

186. Смирнова О. М. Совместимость портландцемента и суперпластификаторов на поликарбоксилатной основе для получения высокопрочного бетона сборных конструкций. *Magazine of Civil Engineering*. № 6. 2016. P. 12-22.

187. Несветаев Г. В. Некоторые вопросы применения добавок для бетонов. *Бетон и железобетон*. 2011. № 2. С. 78-80.

188. Дворкін Л. Й., Бабич Є. М. Швидкотверднучі високоміцні бетони з полікарбоксилатними суперпластифікаторами. *Строительные материалы и изделия*. 2017. № 3-4. С. 18-21.

189. P. Kathirvel. Influence of non chloride accelerator in cement concrete. *International refereed journal of engineering and science*. 2014. Volume 3. Issue 12. P. 24-32.

190. S. Aggoun, M. Cheikh-Zouaoui, N. Chikh, R. Duval. Effect of some admixtures on the setting time and strength evolution of cement pastes at early ages. *Construction and building materials*. 2008. P. 106-110.

191. Van Dam Thomas J. Chemical admixtures for concrete paving mixtures. Federal highway administration. 2019. 11 p.

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

193. Kroviakov S., Zavaloka M., Dudnik L., Kryzhanovskyi V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant Portland cement and Portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the faculty of civil engineering Osijek - e-GFOS*. 2019, Vol. 10, no.19. pp. 81-86. doi: 10.13167/2019.19.8.

194. Kryzhanovskiy V.O., Kroviakov S.O. Strength of rigid pavement concretes modified with polycarboxylate admixture on different types of cement. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. №79. С.92-98. doi: 10.31650/2415-377X-2020-79-92-98.

195. Дворкин Л.И., Житковский В.В., Дворкин О.Л., Разумовский А.Р. Метакаолин – эффективная минеральная добавка для бетонов. *Технологии бетонов*. 2015. № 9-10. С. 21-24.

196. Narmatha M., Felixkala T. Metakaolin – the best material for replacement of cement in concrete. *Journal of mechanical and civil engineering*, Vol. 13. Issue 4. 2016. P. 66-71.

197. ДСТУ Б В.2.7-128-2006. Строительные материалы. Добавки активные минеральные и добавки-наполнители к цементу. Технические условия. Изменение № 1. К.: Мінрегіонбуд України, 2006. 12 с.

198. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Строительные материалы. Песок плотный природный для строительных материалов, изделий, конструкций и работ. Технические условия. К.: Мінрегіонбуд України, 1995. 35 с.

199. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Щебень и гравий плотные природные для строительных материалов, изделий, конструкций и работ. Технические условия. К.: Мінрегіонбуд України, 1998. 15 с.

200. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Строительные материалы. Песок для строительных работ. Методы испытаний. К.: Мінрегіонбуд України, 1998. 28 с.

201. BS EN 12620:2013. Aggregates for concrete. British standard institution: London, UK, 2013.

202. ASTM C 33/C33M-18. Standard Specification for Concrete Aggregates. American Society for Testing and Materials, 2018. 8 p.

203. DIN EN 14889-1-2006. Specifies requirements for steel fibres for structural or non-structural use in concrete, mortar and grout. 25 p.
204. ДСТУ Б В.2.7-273:2011. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. К.: Мінрегіонбуд України, 2011. 14 с.
205. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Строительные материалы. Бетоны. Правила подбора состава. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. 14 с.
206. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. К.: Мінрегіонбуд України, 2013. 31 с.
207. ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Смеси бетонные. Методы испытаний. К.: Мінрегіонбуд України, 2002. 28 с.
208. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Строительные материалы. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. 43 с.
209. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Строительные материалы. Бетоны. Методы определения средней плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости. К.: Мінрегіонбуд України, 2008. 38 с.
210. ДСТУ Б В.2.7-212:2009. Строительные материалы. Бетоны. Методы определения истираемости. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. 9 с.
211. ДСТУ Б В.2.7-49-96. Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании. К.: Мінрегіонбуд України, 1996. 19 с.
212. ДСТУ Б В.2.7-47-96. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования. К.: Мінрегіонбуд України, 1996. 9 с.
213. ДСТУ Б В.2.7-216:2009. Строительные материалы. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. 24 с.
214. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. 2-ое изд. М.: Финансы и статистика, 1981. 263 с.

215. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.

216. Jeff Wu C. F., Hamada M.S. Experiments: Planning, Analysis, and Optimization. 2d ed., Wiley & Sons, 2009. 552 p.

217. Использование COMPEX-99 при моделировании параметров кривых пластической прочности цементно-полимерных композиций с фиброй Куралон / Вознесенский В.А., Довгань П.М., Ляшенко Т.В. и др. *Науковий вісник будівництва: ХДТУБА, ХОТВ АБУ*. Вип.8. Харків, 1999. С.21-28.

218. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетона. М.: Инфра-Инженерия. 2017. 386 с.

219. Дворкін Л. Й. Бетони спеціального призначення. К.: Кондор. 2018. 352 с.

220. Бордюженко О. М., Дворкін Л. Й., Ковальчук Т. В. Розрахунок складів фібробетонів. *Ресурсуекономические материалы, конструкции, строительство и сооружения*. 2018. С. 3-10

221. Дворкин О. Л., Дворкин Л. И., Горячих М. В., Шмигальский В. Н. Проектирование и анализ эффективности составов бетона: монография. Ровно: НУВХП. 2008. 178 с.

222. Баженов, Ю. М. Технология бетона. М.: АСВ. 2011. 528 с.

223. 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. doi:10.1088/1757-899X/1141/1/012003

224. Kryzhanovskiy V.O., Kroviakov S.O. Zavoloka M.V. Influence of metakaolin on properties of concrete modified with polycarboxylate admixture for rigid pavement repair. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 2021, №82, С.90-97. doi: 10.31650/2415-377X-2021-82-90-97

225. 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.

226. Roger D. Till, Randy VanPortfliet. European Concrete Pavement Tour. Michigan Department of Transportation, Research Report № R-1462. Michigan department of transportation. 1992. 20 p.

227. 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.

228. Kurt Smith, Dale Harrington, Linda Pierce, Preshant Ram, Kelly Smith. Concrete Pavement Preservation Guide, Second Edition, Report № FHWA-HIF-14-014. Federal Highway Administration. 2014. 304 p.

229. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. К.: Мінрегіонбуд України, 2016. 71 с.

230. ДСТУ Б В.2.7-42-97. Строительные материалы. Методы определения водопоглощения, плотности и морозостойкости строительных материалов и изделий. С изменением № 1. К.: Мінрегіонбуд України, 1997. 19 с.

231. Шилюк П. С. Пластифіковані товарні бетонні суміші і бетони на основі пуцоланових цементів. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Київ. КНУБіА, 2006. 172 с.

232. Іванищин Г. С. Низькоемісійні змішані цементи та модифіковані бетони і будівельні розчини на їх основі. Диссер. Доктор філософії: 05.23.05 / Львів. Нац. універ. «Львівська політехніка», 2020. 207 с.

233. Saroj Gupta, V. V.L. Kanta Rao, Jayabrata Sengupta. Evaluation of Polyester Fiber Reinforced Concrete for use in Cement Concrete Pavement Works. *Road Materials and Pavement Design*. 2008. P. 441-461,

234. Krayushkina K., Khymeriyk T., Bieliatynskyi A. Basalt fiber concrete as a new construction material for roads and airfields. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 708. No. 012088. 10.1088/1757-899X/708/1/012088.

235. Liu J., Yu Chingchang, Shu Xin, Ran Q., Yang, Yong. Recent advance of chemical admixtures in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2019. 124. No. 105834. 10.1016/j.cemconres.2019.105834.
236. Busari A, Akinmusuru J., Dahunsi B. I. Mechanical Properties of Dehydroxylated Kaolinitic Clay in Self-Compacting Concrete for Pavement Construction. *Silicon*. 2019. №11. 10.1007/s12633-017-9654-6.
237. Salimi Javid, Ramezani pour Amir, Moradi Mohammad Javad. Studying the effect of low reactivity metakaolin on free and restrained shrinkage of high performance concrete. *Journal of Building Engineering*. 2019. № 28. 101053. 10.1016/j.jobbe.2019.101053.
238. Sanjay N. Patil, Anil K. Gupta, Subhash S. Deshpande. Metakaolin-Pozzolanic Material for Cement in High Strength Concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering. Second International Conference on Emerging Trends in Engineering*. 2013. P. 46-49.
239. Dinakar P., Pradosh K. Sahoo, Sriram G. Effect of metakaolin concrete on the properties of high strength concrete. *International journal of concrete structures and materials*. 2013. Vol. 7. № 3. P. 215-223.
240. Vikas Srivastava, Rakesh Kumar and V.C. Agarwal. Metakaolin inclusion: Effect on mechanical properties of concrete. *J. Acad. Indus. Res.* 2012 Vol.1 (5). P. 251-253
241. 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>
242. Puertas F., Santos H., M. Palacios, Martinez-Ramirez S. Polycarboxylate superplasticizer admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behavior in cement pastes. *Advances in Cement Research*. 2005. 17 (2). P. 77-89.
243. Nithya N., Vijaya Sarathy R., Jose Ravindra B., Keerthi Raman K.R. Experimental study on strength and durability properties of concrete with nano

metakaolin. *International Journal of Engineering and Management Research*. 2015. Vol. 5. Issue 2. P. 840-843.

244. Chanakya P., Behera D. Experimental study on compressive strength of concrete by partial replacement of cement with metakaolin. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*. 2016. Vol. 5. Issue 26, P. 5354-5358.

245. Mohammed Ashik M., Gomathi D. Strength properties of concrete using metakaolin. *International journal of engineering research & technology*. 2017. Vol. 6. Issue 11. P. 149-152.

246. Mi Geum Chorzepa, Stephan A. Durham, Matthew Sullivan. Evaluation of Metakaolin and Slag for GDOT Concrete Specifications and Mass Concrete Provision – Phase 1, Report № FHWA-GA-17-1616. Georgia Department of Transportation. 2017. 116 p.

247. Kuruva Syamala Devi. Impacts of cement industry on environment – an overview. *Asia Pacific Journal of Research*. 2017. Vol. 1. Issue 57. P. 156-161.

248. Sulagno Banerjee, Supratip Mondal. High strength and high performance concrete. Mauritius: LAP Lambert Academic Publishing, 2017. 82 p.

249. Дворкін Л. Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В. Метакалін в будівельних розчинах і бетонах: монографія. К.: КНУБіА. 2007. 214 с.

250. Arunakanthi E., Sudarsana Rao H. Effects of calcium chloride in mixing and curing water on strength of high-performance metakaolin concrete. *Indian journal of research*. 2013. Vol. 2. Issue 9. P. 91-94.

251. Zenisek Michal, Vlach Tomas, Laibova Lenka. Dosage of metakaolin in high performance concrete. *Key engineering materials*. 2016. Vol. 722. P. 311-315.

252. K. Srinivasu, M.L.N. Krishna Sai, Venkata Sairam Kumar N. A review on use of metakaolin in cement mortar and concrete. *IOSR International journal of innovative research in science, engineering and technology*. 2014. Vol. 3. Issue 7. P. 14697-14701.

253. M.S. Morsy, Y. Al-Salloum, T. Almusallam, H. Abbas. Effect of nano-metakaolin addition on the hydration characteristics of fly ash blended cement mortar. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2013. 116 (2). P. 845-852.

254. Soneby M., K. H. Khayat. Testing abrasion resistance of high-strength concrete. *Cement concrete and aggregates*. 2001. Vol. 23. № 1. P. 34-43.

255. Semsî Yazıcı, Gozde Inan Sezer. Abrasion resistance estimation of high strength concrete. *Journal of engineering sciences*. 2015. Vol. 6(3). P. 136-148.

256. Калиновская Н. Н. Долговечность бетона. Анализ причин и способы снижения усадочных деформаций модифицированного бетона. *Технологии бетонов*. 2017. №11-12. С. 14-17.

257. J.J. Brooks, M.A. Megat Johari, H. Abbas. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. *Cement & concrete composites*. 2001. P. 495-502.

258. N. Gowripalan. Autogenous shrinkage of concrete at early ages. *25th Australian conference on mechanics of structures and materials*. 2018. P. 1-8.

259. З. Н. Цилосани. Усадка и ползучесть бетонов. Тбилиси: Мецниереба. 1979. 226 с.

260. Александровский С. В. Экспериментально теоретическое исследование усадочных напряжений в бетоне. Бетон и железобетон. М.: Стройиздат. 1965. 285 с.

261. Ministry of Defence. Specification 033 «Pavement quality for concrete airfields», 2017. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/specifications> (дата звернення: 04.03.2019).

262. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Фиц С.Б. Бетон в условиях ударных воздействий. Одесса: Внешрекламсервис, 2004. 270 с.

263. Surianinov M.G., Neutov S.P., Korneeva I.B. Deformability and crack resistance of airfield slabs. *Вестник ОГАСА*. 2021. Вып. 85. С. 52-61.

264. Неутов С.Ф., Корнеева И.Б. Влияние стальной фибры на прочностные и деформативные свойства фибробетона. *Вестник ОГАСА*. 2019. Вып. 76. С. 63-69.

265. Неутов С.Ф., Сурьянинов Н.Г. Математическая модель фибробетона на основе эффективных жесткостных характеристик. *Вестник ОГАСА*. 2019. Вип. 77. С. 76-83.

266. Surianinov M.G., Neutov S.P., Korneeva I.V. Laboratory testing of steel fiber concrete prism for tension in bending. *Вестник ОГАСА*. 2020. Вип. 81. С. 105-113.

267. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги, ч.2. Будівництво. К.: Мінрегіонбуд України, 2015. 104 с.

268. Выровой В. Н., Суханов В. Г., Коробко О. А., Закорчемная Н. О., Непомящий А. Н. Сопротивление морозному разрушению бетонов для дорожного покрытия. *Вестник ОГАСА*. 2015. Вип. 58. С. 88-95.

269. Непомящий А. Н., Выровой В. Н., Суханов В. Г. Влияние условий замораживания на морозостойкость строительных композитов. *Архитектура и строительство*. 2020. № 4 (7). С. 42-46.

270. ДСТУ 8858:2019. Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови. К.: Мінрегіонбуд України, 2019. 31 с.

271. 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.

272. Непомящий А. Н., Выровой В. Н., Суханов В. Г. Влияние условий замораживания на морозостойкость строительных композитов. *Архитектура и строительство*. 2020. № 4 (7). С. 42-46.

273. Выровой В.Н. Механизм усадки твердеющих и затвердевших композиционных строительных материалов. *Технологическая механика бетона: Сб. науч. тр.* - Рига: РПИ. 1985. С. 22-27.

274. Rahmani Tara, Kiani Behnam, Bakhshi Mehdi, Shekarchizadeh Mohammad. Application of Different Fibers to Reduce Plastic Shrinkage Cracking of Concrete. *RILEM Bookseries*. 2012. №4. 635-642. 10.1007/978-94-007-4566-7_62.

275. Толмачев Д.С. Влияние усадки на структуру и прочность растворов. *Строительные материалы*. 2013. №10. С. 62-65
276. Holt Erika. Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete. *Tech Res Centre Finland: VTT Publicat*. 2001. 446 p.
277. Суханов В.Г., Выровой В.Н., Коробко О.А. Структура материала в структуре конструкции. Одесса: Полиграф, 2016. 244 с.
278. Afroughsabet V., Biolzi L., Ozbakkaloglu T. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of Materials Science*. 2016. 51 (14), P. 6517-6551.
279. EN 1542:1999. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods. British standard institution: London, UK, 1999.
280. ДСТУ-Н Б В.2.3-36:2016. Настанова з влаштування жорсткого дорожнього одягу. К.: Мінрегіонбуд України, 2016. 26 с.
281. 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.
282. Kroviakov S.O., Kryzhanovskyi V.O. Influence of fiber reinforcement on concrete shrinkage for rigid road and airfield pavement repair. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 2021, №84, С.78-86.

Додатки

**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. 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>

2. Kroviakov S.O., Kryzhanovskyi V.O. Influence of fiber reinforcement on concrete shrinkage for rigid road and airfield pavement repair. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2021, №84. С.78-86. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2021-84-78-86>

3. Kryzhanovskiy V.O., Kroviakov S.O. Zavoloka M.V. Influence of metakaolin on properties of concrete modified with polycarboxylate admixture for rigid pavement repair. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2021, №82. С.90-97. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2021-82-90-97>

4. Kryzhanovskiy V.O., Kroviakov S.O. Strength of rigid pavement concretes modified with polycarboxylate admixture on different types of cement. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020, №79. С.92-98. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-92-98>

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

5. Zheljko K., 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. 1174. <https://doi.org/10.3390/app12031174> (індексується Scopus, Web of Science)

6. 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. pp. 1-10. <https://doi.org/10.13167/2021.23.1> (індексується Web of Science)

7. Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Zavoloka M. Steel fibrous concrete with high-early strength for rigid pavements repair. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021, 1162. No. 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012008>

8. 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>

9. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L., Kryzhanovskyi V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the faculty of civil engineering Osijek - e-GFOS*. 2019, Vol. 10, no.19. pp. 81-86. <https://doi.org/10.13167/2019.19.8> (індексується Web of Science)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Кровяков С.О., Крижановський В.О., Заволока М.В. Вплив металевої фібри і прискорювача твердіння на міцність фібробетонів для ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів. Матеріали міжнародного семінару «*Моделювання та оптимізація будівельних композитів*». Одеса: ОДАБА, 2021, С. 46-50.

11. Андрєєва О.А., Заволока М.В., Кровяков С.О., Клименко Є.В., Софіяник А.М., Крижановський В.О., Шевченко В.В. Обстеження стану

бетонного покриття нової злітно-посадкової смуги, руліжних доріжок та перону міжнародного аеропорту «Одеса». Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції *«Експлуатація та реконструкція будівель і споруд»*. Одеса: ОДАБА, 2021, С. 30-31.

12. Кровяков С.О., Крижановський В.О., Міцність сталевібробетонів для ремонту жорстких дорожніх покриттів у різному віці. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції *«Гідротехнічне і транспортне будівництво»*. Одеса: ОДАБА, 2021, С.36-38

13. Кровяков С.О., Крижановський В.О. Модифікований сталевібробетон як ефективний матеріал для ремонту жорстких дорожніх покриттів. Збірка тез доповідей 77-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2021. С.170

14. Кровяков С.О., Крижановський В.О. Модифіковані бетони для влаштування і ремонту жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції *«Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій»*. Одеса: ОДАБА, 2021, С.52-55.

15. Кровяков С.О., Крижановський В.О. Модифіковані полікарбосилатною добавкою бетони для ремонту жорстких дорожніх покриттів. Збірник тез доповідей III всеукраїнської науково-практичної конференції *«Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеса»*. Одеса: ОДАБА, 2020, С.152.

16. Кровяков С.О., Крижановський В.О. Міцність модифікованих бетонів жорстких дорожніх покриттів на різних типах цементу. Збірка тез доповідей 76-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2020. С. 234.

Продовження додатку А**Відомості про апробацію результатів дисертації:**

- 76-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 25-29 травня 2020 р. – очна участь);
- III всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси» (Україна, м. Одеса, 17-18 грудня 2020 р. – очна участь);
- міжнародна науково-технічна конференція «Структурування та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (Україна, м. Одеса, 08-09 квітня 2021 р. – очна участь);
- 77-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна, м. Одеса, 13-14 травня 2021 р. – очна участь);
- міжнародна наукова конференція Computational Civil Engineering CCE2021 (Румунія, м. Яси, 27-29 травня 2021 р. – дистанційна участь);
- науково-технічна конференція «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (Україна, м. Одеса, 03-04 червня 2021 р. – очна участь);
- IV міжнародна науково-практичної конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (Україна, м. Одеса, 09-10 вересня 2021 р. – очна участь);
- міжнародний науковий семінар «Моделювання та оптимізація будівельних композитів» (Україна, м. Одеса, 18-19 листопада 2021 р. – очна участь).

Додаток Б.

Акти впровадження результатів досліджень

ТОВ «БАУТЕХ-УКРАЇНА»

Одеська державна академія будівництва та архітектури

«Затверджую»

Генеральний директор

ТОВ «БАУТЕХ-УКРАЇНА»

_____ І. Д. Запорожан

«__» листопада 2021 р.



РЕГЛАМЕНТ

**з технології приготування і застосування
швидкотвердіючого сталевібробетону для глибинного ремонту
жорстких покриттів автодоріг і аеродромів**

Одеса – 2021

Регламент розроблений в Одеській державній академії будівництва та архітектури.

Ректор академії – к.т.н., проф. Ковров А.В.

Розробники: - д.т.н. доц. Кровяков С.О., проректор з наукової роботи;

- к.т.н., проф. Заволока М.В., завідувач кафедри виробництва будівельних виробів та конструкцій, керівник атестованої науково-дослідної лабораторії випробувань будівельних матеріалів;
- Крижановський В. О., аспірант кафедри автомобільних доріг та аеродромів (відповідальний виконавець).



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

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

05. 01. 2022 № 29-10

На № _____ від _____

Довідка

про впровадження результатів наукових досліджень

Довідка засвідчує, що результати досліджень аспіранта Крижановського Віталія Олександровича (науковий керівник – д.т.н., доц. С.О. Кровяков), наведені у його дисертаційній роботі на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 192 - Будівництво та цивільна інженерія за темою «Модифіковані бетони і фібробетони для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів» впроваджені в навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Результати досліджень використовуються у методичних матеріалах освітніх компонентів «Будівництво та реконструкція автомобільних доріг та штучних споруд» і «Ресурсозбереження та новітні технології у будівництві автомобільних доріг та аеродромів», а також при підготовці дипломних робіт магістрів освітньо-професійної програми «Автомобільні дороги і аеродроми» підготовки магістрів спеціальності 192 - Будівництво та цивільна інженерія.

Проректор з НПР, д.т.н., проф.

Юрій КРУТІЙ