

## 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 колееутворення, високій міцності на розтяг при згині та морозостійкості при низькій стиратності.

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 сталевією фіброю. 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 ІІ/А-ШІ-500 і ПЦЦ ІV/А-500 Р 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-ІІ/А-ІІ-500 Р-Н, ПЦЦ ІV/А-500 Р, ПЦ ІІ/А-ІІІ-500) встановлено, що бетони на основі ПЦ-ІІ/А-ІІ-500 Р-Н і ПЦ ІІ/А-ІІІ-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 ІІ/А-ІІІ-500.

Проведені дослідження властивостей фібробетонів з поліпропіленою 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 ІІ/А-ІІІ-500 і ПЦЦ ІV/А-500. Встановлено, що для бетонів на обох типах цементу раціональною є кількість добавки 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. 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  $30 \text{ кг/м}^3$  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. 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  $9,6 \text{ кг/м}^3$ );

$X_2$  – кількість сталеві анкерної фібри діаметром 1 мм і довжиною 50 мм, від 0 до  $100 \text{ кг/м}^3$ .

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/м<sup>3</sup> 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/см<sup>2</sup>. Незалежно від кількості прискорювача твердіння модифіковані суперпластифікатором MasterGlenium SKY 608 фібробетони з кількістю сталеві фібри від 40 кг/м<sup>3</sup> характеризуються високою морозостійкістю і зносостійкістю ( $G < 0,25$  г/см<sup>2</sup>), що забезпечує достатню довговічність матеріалу для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів.

За рахунок використання раціональної кількості сталевих 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  $50 \text{ кг/м}^3$  фібри адгезійна міцність підвищується на 7..9%, при використанні  $100 \text{ кг/м}^3$  – 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 сталевих 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 «БАУТЄХ-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, стираність.

## 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/m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup>);

$X_2$  – amount of steel anchor fiber with a diameter of 1 mm and a length of 50 mm, from 0 to 100 kg/m<sup>3</sup>.

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/m<sup>3</sup> 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/cm<sup>2</sup>. Regardless of the hardening accelerator amount, fibrous concretes modified with MasterGlenium SKY 608 superplasticizer with a quantity of steel fibers from 40 kg/m<sup>3</sup> 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  $50 \text{ kg/m}^3$  of fiber, the adhesive strength increases by 7..9%, when using  $100 \text{ kg/m}^3$  – 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.