

АНОТАЦІЯ

Гедулян Д. Ю. Фібробетони підвищеної довговічності для дорожніх одягів та транспортних споруд.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Одеська державна академія будівництва та архітектури – Одеса, 2025.

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 застосовані методи досліджень, наведені положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів.

У *першому розділі* проаналізовано досвід використання бетону і фібробетону для влаштування жорстких дорожніх одягів та транспортних споруд. Показано, що жорсткі дорожні покриття активно застосовуються на основних автомагістралях Європи, США та інших розвинутих країн. Використання жорстких покриттів є вигідним завдяки їх перевагам, основними серед яких є високі показники міцності та довговічності, стійкість до утворення колій та хвиль. За останні роки в Україні також спостерігається інтенсивне збільшення обсягу руху та ваги вантажних автомобілів. Крім того, військові дії на території нашої держави зумовлюють масштабні руйнування існуючої транспортної інфраструктури, майже 90% якої ще в довоєнний період не відповідало вимогам сучасних нормативних документів за експлуатаційними характеристиками.

Описано основні причини руйнування та зниження якісних показників бетону для влаштування жорстких дорожніх одягів та транспортних споруд. Показано, що у якості ефективного матеріалу для жорстких покриттів використовуються модифіковані добавками суперпластифікаторами бетони та фібробетони, зокрема з поліпропіленовою фіброю. Проаналізовано особливості впливу зазначених добавок та дисперсного армування на властивості бетонів і

фібробетонів а також досвід використання різних типів добавок модифікаторів та видів дисперсного армування у бетонах жорстких покриттів.

Сформульовано *робочу гіпотезу* роботи. Основними деструктивними впливами для конструкцій дорожніх одягів та транспортних споруд крім робочих навантажень є заморожування-відтаювання, абразивний вплив та в окремих випадках вплив кислотного середовища, зокрема при обробці доріг складами для боротьби з ожеледицею. В даних умовах довговічність обумовлюється насамперед стираністю, морозостійкістю та корозійною стійкістю бетонів. Відомо, що ефективним методом підвищення комплексу окреслених фізико-механічних характеристик є використання дисперсного армування стійкою до корозії фіброю, зокрема поліпропіленовою. Науковий інтерес також представляє дослідження ефективності застосування сталеві фібри в бетонах дорожніх одягів і транспортних споруд. При цьому дисперсне армування має застосовуватися разом з ефективним пластифікатором, що забезпечить комплексний вплив на структуру і властивості бетону.

Спираючись на проведений огляд результатів досліджень різних вчених за темою дисертаційної роботи та на робочу гіпотезу, була сформульована *мета роботи*: розробка фібробетонів для дорожніх одягів і транспортних споруд з необхідною міцністю, підвищеною довговічністю та корозійною стійкістю за рахунок використання раціональної кількості поліпропіленової фібри і суперпластифікатору полікарбоксилатного типу.

У *другому розділі* наведено методику досліджень фізико-механічних властивостей і структури бетонів та характеристика використаних матеріалів.

Дослідження проводилися у два логічно пов'язаних етапи. На першому етапі роботи досліджувались склади бетонів та фібробетонів на основі портландцементу CRH ПЦ II/A-III 500 P-H. Порівнювалися бетони, дисперсно-армовані поліпропіленовою фіброю «Baumesh» та сталеві анкерною фіброю виробництва компанії «Стальканат-Сілур». Для всіх досліджених фібробетонів визначалися показники міцності на стиск, міцності на розтяг при згині, морозостійкості, кислотостійкості та стираності. На другому етапі з

використанням методів експериментально-статистичного моделювання досліджувалися властивості та структура фібробетонів з дисперсним армуванням поліпропіленовою фіброю «Baumesh» та суперпластифікатором полікарбоксилатного типу MC-PowerFlow 3200. На завершенні другого етапу роботи з урахуванням показників міцності, морозостійкості та стираності визначалися раціональні склади фібробетонів для жорстких дорожніх одягів та транспортних споруд, а також здійснювалося провадження у виробництво обраних раціональних складів фібробетонів.

Третій розділ присвячений розробці складів та дослідженню властивостей фібробетонів жорстких дорожніх одягів і транспортних споруд зі сталеною і поліпропіленовою фіброю. Досліджували властивості бетонів 7 складів. Як контрольний використовувався бетон без фібри з проектним класом C20/25. У дослідженні фібробетони вводилася поліпропіленова фібра Baumesh у кількості 2,0, 2,5 і 3,0 кг/м³, або сталева анкерна фібра у кількості 15, 20 і 25 кг/м³. Всі склади бетонів та фібробетонів мали однакову марку легкоукладаності S4, що досягалось за рахунок варіювання кількості суперпластифікатора на полікарбоксилатній основі.

У результаті порівняння властивостей бетонів та фібробетонів з різним типом фібри встановлено, що дисперсне армування з використанням як сталеної анкерної фібри, так і поліпропіленової фібри позитивно впливає на міцність на стиск, міцність на розтяг при згині, зносостійкість та морозостійкість бетонів. При використанні сталеної фібри міцність на стиск у віці 7 діб зростає в середньому на 11,3%, при використанні поліпропіленової фібри «Baumesh» – в середньому на 7,6%. У проектному віці 28 діб зростання міцності на стиск при використанні сталеної фібри становить в середньому 16,4%, при використанні поліпропіленової фібри «Baumesh» – в середньому 12,6%. При використанні сталеної фібри міцність на розтяг при згині у віці 28 діб зростає в середньому на 30,4%, а при використанні поліпропіленової фібри «Baumesh» – на 30,2%. При використанні сталеної фібри стираність бетону

знижується на 0,08-0,16 г/см² (в середньому на 30,9%), при використанні поліпропіленової фібри «Baumesh» – на 0,1-0,18 г/см² (в середньому на 39,1%).

Показано, що дисперсне армування з використанням як сталевих анкерних фібри, так і поліпропіленової фібри «Baumesh» позитивно впливає на морозостійкість бетону. Фібробетони мають клас за морозостійкістю F200, бетони без використання фібри – F150.

Досліджено вплив дисперсного армування на корозійну стійкість бетону в кислотному середовищі з рН = 3. Встановлено, що використання обох типів фібри сприяє підвищенню корозійної стійкості бетону для дорожніх покриттів та транспортних споруд. Ефективність поліпропіленових волокон в умовах кислотного середовища є не нижче сталевих, що можна пояснити кращим зчепленням з матрицею бетону та хімічною інертністю до кислот. Використання фібри «Baumesh» у кількості 3,0 кг/м³ дозволяє підвищити корозійну стійкість бетонів у кислотному середовищі навіть в більшій ступені, ніж використання сталевих анкерних фібри у кількості 25 кг/м³.

Показано, що використання дисперсного армування поліпропіленовою фіброю «Baumesh» у кількості до 3 кг/м³ дозволяє підвищити міцність бетону на стиск і на розтяг при згині, морозостійкість та зносостійкість (зменшити стирання) у тому ж масштабі, як і використання дисперсного армування сталевими анкерними фібрами у кількості до 25 кг/м³. Проте за рахунок суттєво різного дозування волокон подорожчання 1 м³ бетону при використанні сталевих фібри є більш відчутним, ніж при використанні поліпропіленової фібри.

З врахуванням результатів досліджень на наступному етапі в якості основного типу дисперсної арматури було обрано поліпропіленову фібру «Baumesh».

Четвертий розділ присвячено дослідженням властивостей фібробетонів для жорстких дорожніх покриттів та транспортних споруд з дисперсним армуванням поліпропіленовою фіброю «Baumesh» та впровадженню результатів досліджень. За 15 точковим D-оптимальним планом проводився 3-х

факторний експеримент, в якому варіювалися наступні фактори складу фібробетонів:

- X_1 , кількість портландцементу, від 300 до 380 кг/м³;
- X_2 , кількість поліпропіленової фібри «Baumesh», від 2,5 до 3,5 кг/м³;
- X_3 , кількість суперпластифікатору MC-PowerFlow 3200, від 1,0 до 1,6% від маси цементу.

Рухомість всіх досліджених на даному етапі роботи фібробетонних сумішей була рівною S1 при значеннях осадки конусу від 2 до 4 см. Встановлено, що при збільшенні кількості портландцементу В/Ц сумішей рівної рухомості знижується. Приблизно рівний ефект за масштабом зниження В/Ц досягається при збільшенні кількості добавки суперпластифікатору з 1,0 до 1,6% від маси цементу. Зміна кількості поліпропіленової фібри має обмежений вплив на показник В/Ц.

Зміна кількості армуючих волокон «Baumesh» в межах факторного простору експерименту несуттєво впливає на міцність фібробетонів на стиск. Збільшення кількості поліпропіленової фібри з 2,5 до 3,5 кг/м³ при дозуванні в'язучого на рівні 300-340 кг/м³ та вмісті добавки суперпластифікатору 1-1,3 % викликає зростання міцності на стиск на 4-8%. При максимальній кількості в'язучого і суперпластифікатору збільшення кількості фібри понад 2,5 кг/м³ навпаки дещо знижує міцність бетону на стиск. Показник міцності досліджуваних фібробетонів при максимальному дозуванні суперпластифікатора 1,6% та вмісті в'язучого 380 кг/м³ приймає максимальне значення у 71,8 МПа.

Міцність фібробетонів на розтяг при згині підвищується при збільшенні кількості портландцементу. Зростання кількості суперпластифікатору також позитивно впливає на величину f_{ctk} . Збільшення кількості фібри з 2,5 до 3,0 кг/м³ ефективно, на 0,7-0,8 МПа, підвищує міцність бетону на розтяг при згині. Максимальний показник міцності на розтяг при згині досліджуваних в рамках експерименту фібробетонів досягав рівня 7,42 МПа.

Підвищення кількості дисперсного армування поліпропіленової фіброю

відчутно підвищує зносостійкість фібробетону. Досліджені склади фібробетону з вмістом волокон фібри на рівні 3 кг/м³ та суперпластифікатора на рівні 1,3% характеризуються високим показником зносостійкості ($G < 0,25$ г/см²), що позитивно впливає на довговічність матеріалу для влаштування жорстких дорожніх покриттів та транспортних споруд. Комплексне застосування фібри і суперпластифікатора дозволяє зменшити стиранисть бетону на 50,7%.

Показано, що розроблені модифіковані фібробетони відповідають усім вимогам, які застосовуються до матеріалів для влаштування жорстких дорожніх покриттів та транспортних споруд.

З використанням комплексу розрахованих ЕС-моделей методом багатокритеріальної оптимізації обрано оптимальні склади фібробетонів для жорстких дорожніх одягів доріг Іа категорій. Обрані склади фібробетонів мають найменшу собівартість при забезпеченій необхідній міцності та підвищену довговічність. Визначені за результатами досліджень оптимальні склади фібробетонів для дорожніх одягів і транспортних споруд з необхідною міцністю та підвищеною довговічністю були використані ТОВ «Сілікат ЛТД» при влаштуванні мережі під'їздів важкої техніки та вантажівок до складських приміщень за адресою м. Одеса, вул. Шота Руставелі, 9, а також ТОВ Науково-виробничий центр «ЕКОСТРОЙ+» при влаштуванні покриттів частини внутрішньодворового простору комплексу споруд, розташованих у місті Одесі. Результати досліджень використовуються в освітньому процесі в Одеській державній академії будівництва та архітектури при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги та аеродроми» спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Ключові слова: дорожнє покриття, дорожній одяг, транспортні споруди, дисперсне армування, сталева фібра, поліпропіленова фібра, суперпластифікатор, рання міцність, проєктна міцність, морозостійкість, корозійна стійкість, стиранисть.

ABSTRACT

Hedulian D. Yu. Fiber-reinforced concretes of increased durability for road surfaces and transport structures.

PhD thesis. Specialty 192 – Construction and civil engineering – Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odesa, 2025.

The *introduction* justifies the choice and relevance of the research topic, shows the connection of the work with scientific programs, plans and topics, formulates the purpose of the work and research objectives, describes the applied research methods, gives the provisions of scientific novelty and practical significance of the obtained results.

The *first section* analyzes the experience of using concrete and fiber-reinforced concrete for the arrangement of rigid road surfaces and transport structures. It is shown that rigid road surfaces are actively used on the main highways of Europe, the USA and other developed countries. The use of rigid surfaces is profitable due to their advantages, the main ones of which are high strength and durability, resistance to rutting and wave formation. In recent years, Ukraine has also observed an intensive increase in the volume of traffic and weight of trucks. In addition, military operations on the territory of our state cause large-scale destruction of the existing transport infrastructure, almost 90% of which in the pre-war period did not meet the requirements of modern regulatory documents for operational characteristics.

The main causes of destruction and reduction in the quality indicators of concrete for the arrangement of rigid road surfaces and transport structures are described. It is shown that concretes and fiber-reinforced concretes, in particular with polypropylene fiber, modified with superplasticizer additives are used as an effective material for rigid surfaces. The features of the influence of the specified additives and dispersed reinforcement on the properties of concretes and fiber-reinforced concretes are analyzed, as well as the experience of using different types of modifier additives and types of dispersed reinforcement in concretes of rigid surfaces.

A *working hypothesis* of the work is formulated. The main destructive influences on the structures of road surfaces and transport structures, in addition to working loads, are freezing-thawing, abrasive effects and in some cases the influence of an acidic environment, in particular when treating roads with compounds for combating ice. In these conditions, durability is determined primarily by the abrasion, frost resistance and corrosion resistance of concretes. It is known that an effective method of increasing the complex of the outlined physical and mechanical characteristics is the use of dispersed reinforcement with corrosion-resistant fiber, in particular polypropylene. Scientific interest is also represented by the study of the effectiveness of the use of steel fiber in concrete for road surfaces and transport structures. In this case, dispersed reinforcement should be used together with an effective plasticizer, which will provide a comprehensive effect on the structure and properties of concrete.

Based on the review of the results of research by various scientists on the topic of the dissertation work and on the working hypothesis, *the goal of the work* was formulated: the development of fiber concretes for road surfaces and transport structures with the necessary strength, increased durability and corrosion resistance by using a rational amount of polypropylene fiber and a polycarboxylate-type superplasticizer.

The *second section* presents the methodology for studying the physical and mechanical properties and structure of concretes and the characteristics of the materials used.

The research was carried out in two logically related stages. At the first stage of the work, the compositions of concretes and fiber-reinforced concretes based on Portland cement CRH PC II/A-Sh 500 R-N were studied. Concretes dispersed-reinforced with polypropylene fiber "Baumesh" and steel anchor fiber manufactured by the company "Stalkanat-Silur" were compared. For all the studied fiber-reinforced concretes, the indicators of compressive strength, tensile strength when bending, frost resistance, acid resistance and abrasion resistance were determined. At the second stage, using experimental and statistical modeling methods, the properties and

structure of fiber-reinforced concrete with dispersed reinforcement with polypropylene fiber "Baumesh" and a polycarboxylate superplasticizer MC-PowerFlow 3200 were studied. At the end of the second stage of work, taking into account the indicators of strength, frost resistance and abrasion, rational compositions of fiber-reinforced concrete for rigid road surfaces and transport structures were determined, and the selected rational compositions of fiber-reinforced concrete were also put into production.

The *third section* is devoted to the development of compositions and the study of the properties of fiber-reinforced concrete for rigid road surfaces and transport structures with steel and polypropylene fiber. The properties of concrete of 7 compositions were studied. Concrete without fiber with design class C20/25 was used as a control sample. The studied fiber-reinforced concretes were introduced with polypropylene fiber "Baumesh" in the amount of 2.0, 2.5 and 3.0 kg/m³, or steel anchor fiber in the amount of 15, 20 and 25 kg/m³. All concrete and fiber-reinforced concrete compositions had the same workability grade S4, which was achieved by varying the amount of polycarboxylate-based superplasticizer.

As a result of comparing the properties of concretes and fiber-reinforced concretes with different types of fibers, it was found that dispersed reinforcement using both steel anchor fibers and polypropylene fibers has a positive effect on the compressive strength, bending tensile strength, wear resistance and frost resistance of concretes. When using steel fibers, the compressive strength at the age of 7 days increases by an average of 11.3%, when using polypropylene fibers "Baumesh" – by an average of 7.6%. At the design age of 28 days, the increase in compressive strength when using steel fibers is an average of 16.4%, when using polypropylene fibers "Baumesh" – by an average of 12.6%. When using steel fiber, the tensile strength at the age of 28 days increases by an average of 30.4%, and when using polypropylene fiber "Baumesh" – by 30.2%. When using steel fiber, the abrasion of concrete decreases by 0.08-0.16 g/cm² (on average by 30.9%), when using polypropylene fiber "Baumesh" – by 0.1-0.18 g/cm² (on average by 39.1%).

It is shown that dispersed reinforcement using both steel anchor fiber and polypropylene fiber "Baumesh" has a positive effect on the frost resistance of concrete. Fiber concretes have a frost resistance class of F200, concretes without the use of fiber – F150.

The influence of dispersed reinforcement on the corrosion resistance of concrete in an acidic environment with $\text{pH} = 3$ was investigated. It was found that the use of both types of fiber contributes to the increase in the corrosion resistance of concrete for road surfaces and transport structures. The effectiveness of polypropylene fibers in acidic environments is not lower than steel fibers, which can be explained by better adhesion to the concrete matrix and chemical inertness to acids. The use of "Baumesh" fibers in an amount of 3.0 kg/m^3 allows to increase the corrosion resistance of concrete in an acidic environment even to a greater extent than the use of steel anchor fibers in an amount of 25 kg/m^3 .

It has been shown that the use of dispersed reinforcement with polypropylene fiber "Baumesh" in an amount of up to 3 kg/m^3 allows to increase the compressive and tensile strength of concrete in bending, frost resistance and wear resistance (reduce abrasion) to the same extent as the use of dispersed reinforcement with steel anchor fiber in an amount of up to 25 kg/m^3 . However, due to the significantly different dosage of fibers, the increase in the price of 1 m^3 of concrete when using steel fiber is more noticeable than when using polypropylene fiber.

Taking into account the results of the research, at the next stage, polypropylene fiber "Baumesh" was chosen as the main type of dispersed reinforcement.

The *fourth section* is devoted to the study of the properties of fiber-reinforced concrete for rigid road surfaces and transport structures with dispersed reinforcement with polypropylene fiber "Baumesh" and the implementation of the research results. A 3-factor experiment was conducted according to the 15-point D-optimal plan, in which the following factors of the fiber-reinforced concrete composition varied:

- X_1 , the amount of Portland cement, from 300 to 380 kg/m^3 ;
- X_2 , the amount of polypropylene fiber "Baumesh", from 2.5 to 3.5 kg/m^3 ;

– X_3 , the amount of superplasticizer MC-PowerFlow 3200, from 1.0 to 1.6% of the cement mass.

The mobility of all fiber-reinforced concrete mixtures studied at this stage of work was equal to S1 at cone settlement values from 2 to 4 cm. It was found that with an increase in the amount of Portland cement, the W/C of equal mobility mixtures decreases. Approximately the same effect in terms of the scale of the W/C reduction is achieved with an increase in the amount of superplasticizer additive from 1.0 to 1.6% of the cement mass. Changing the amount of polypropylene fiber has a limited effect on the W/C indicator.

Changing the amount of reinforcing fibers "Baumesh" within the factor space of the experiment does not significantly affect the compressive strength of fiber-reinforced concrete. Increasing the amount of polypropylene fiber from 2.5 to 3.5 kg/m³ at a binder dosage of 300-340 kg/m³ and a superplasticizer additive content of 1-1.3% causes an increase in compressive strength by 4-8%. With the maximum amount of binder and superplasticizer, increasing the amount of fiber above 2.5 kg/m³, on the contrary, slightly reduces the compressive strength of concrete. The strength index of the studied fiber concretes at the maximum dosage of superplasticizer 1.6% and the binder content of 380 kg/m³ takes the maximum value of 71.8 MPa.

The tensile strength in bending of fiber concretes increases with an increase in the amount of Portland cement. The increase in the amount of superplasticizer also has a positive effect on the value of f_{ctk} . An increase in the amount of fiber from 2.5 to 3.0 kg/m³ effectively increases the tensile strength of concrete in bending by 0.7-0.8 MPa. The maximum tensile strength of the fiber concretes studied in the experiment reached the level of 7.42 MPa.

Increasing the amount of dispersed reinforcement with polypropylene fiber significantly increases the wear resistance of fiber concrete. The studied fiber concrete compositions with a fiber content of 3 kg/m³ and a superplasticizer of 1.3% are characterized by a high wear resistance index ($G < 0.25$ g/cm²), which positively affects the durability of the material for the arrangement of rigid road surfaces and

transport structures. The complex use of fiber and superplasticizer allows reducing the abrasion of concrete by 50.7%.

It is shown that the developed modified fiber concretes meet all the requirements that apply to materials for the arrangement of rigid road surfaces and transport structures.

Using a complex of calculated ES-models by the method of multicriteria optimization, optimal fiber concrete compositions for rigid road surfaces of Ia category roads were selected. The selected fiber concrete compositions have the lowest cost while ensuring the required strength and increased durability. The optimal compositions of fiber-reinforced concrete for road surfaces and transport structures with the required strength and increased durability, determined based on the results of the research, were used by LLC "Silicat LTD" when arranging a network of entrances for heavy machinery and trucks to warehouses at the address Odesa, Shota Rustaveli St., 9, as well as LLC Scientific and Production Center "EKOSTROY+" when arranging coatings for part of the inner courtyard space of a complex of structures located in the city of Odessa. The results of the research are used in the educational process at the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture in the preparation of applicants for the second (master's) level of higher education in the educational and professional program "Highways and Airfields" of specialty 192 Construction and Civil Engineering.

Key words: road surface, road clothing, transport structures, dispersed reinforcement, steel fiber, polypropylene fiber, superplasticizer, early strength, design strength, frost resistance, corrosion resistance, abrasion resistance.