

Національний університет водного господарства та природокористування
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ковальчук Тарас Володимирович

УДК 691.328

ДИСЕРТАЦІЯ
ВИСОКОМІЦНИЙ ФІБРОБЕТОН ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИМ
ДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби
19 - архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(доктора філософії)

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

_____ Т.В.Ковальчук

Науковий керівник: Дворкін Леонід Йосипович, доктор технічних наук,
професор

Рівне – 2019

АНОТАЦІЯ

Ковальчук Т.В. Високоміцний фібробетон із композиційним дисперсним армуванням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробництво» (19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України. – Рівне, 2019.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному і експериментальному дослідженню високоміцного дрібнозернистого фібробетону із композиційним дисперсним армуванням з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Проведено аналітичний огляд літературних джерел, присвячених проблемам отримання фібробетонів з покращеними експлуатаційними характеристиками. Розглянуто питання, пов'язані з основними принципами дисперсного армування, а також визначено теоретичні передумови досліджень. На основі здійсненого аналізу сформульовано гіпотезу про можливість попередження розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування із застосуванням в оптимальному співвідношенні сталеві та базальтової фібри для отримання високоміцного дисперсноармованого бетону з покращеними експлуатаційними властивостями.

Наведено характеристики вихідних матеріалів, описані основні методики досліджень, використані в роботі.

На основі аналізу комплексу експериментально-статистичних моделей міцнісних параметрів сталеві фібробетонів встановлено ефективність застосування для важких та дрібнозернистих бетонів хвилястої сталеві фібри, що має підвищену поверхню зчеплення з бетоном. Отримані кількісні залежності, що характеризують вплив водоцементного відношення та вмісту фібри на міцність сталеві фібробетонів при стиску та розтяг при згині а також їх співвідношення.

Показано, що застосування дрібнозернистого бетону на досліджуваних видах фібри дозволяє підвищити коефіцієнт ефективності дисперсного армування (тобто співвідношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску) більше ніж у два рази у порівнянні з неармованими бетонами і на 20...25 % у порівнянні з крупнозернистими.

В роботі досліджена кінетика зростання міцності досліджуваних фібробетонів і показано, що при В/Ц в межах 0,35...0,4 через 1 добу можливе досягнення до 50% від марочної міцності як при стиску, так і на розтяг при згині. При В/Ц < 0,35 марочна міцність звичайного важкого і дрібнозернистого бетонів знаходяться в межах, характерних для високоміцних бетонів і складає 60...100 МПа при стиску.

За допомогою експериментально-статистичних моделей за умов забезпечення максимальних значень міцності на розтяг при згині і, відповідно, коефіцієнта ефективності дисперсного армування визначено оптимальний вміст сталевих фібри. При оптимальних значеннях вмісту фібри для різних видів фібробетону коефіцієнт ефективності дисперсного армування збільшується на 25...40%.

Виконані порівняльні дослідження способів введення фібри в бетонну суміш: з попереднім введенням в суху суміші і з введенням в готову бетонну суміш. При достатній тривалості та інтенсивності перемішування міцнісні параметри сталевих фібробетонів, отриманих при двох способах введення, відрізняються несуттєво. Вибір методу введення фібри повинен враховувати конкретні технологічні можливості даного підприємства. Встановлено, що найбільша однорідність розподілення фібри для дрібнозернистого фібробетону досягається при застосуванні високорухомих бетонних сумішей з ОК \geq 15 см.

Експериментальними дослідженнями підтверджено ефективність орієнтування сталевих фібри під дією магнітного поля, що дозволяє покращити міцнісні характеристики сталевих фібробетонів. Цей ефект стає суттєвим в міру збільшення рухомості бетонної суміші і дозволяє підвищити міцність на розтяг при згині дрібнозернистого сталевих фібробетону до 15 %. Показано, що вплив магнітного поля

на орієнтування сталеві фібри ефективно суміщати з її вібруванням. Відзначено позитивний вплив на ефект орієнтування фібри добавок суперпластифікаторів, завдяки збільшенню тиксотропії в процесі вібрування.

На основі аналізу комплексу експериментально-статистичних моделей міцнісних параметрів фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням встановлено ефективність застосування базальтової фібри довжиною волокон 12 мм в комплексі з хвилястою сталеві фіброю, в оптимальних співвідношеннях. Отримані кількісні залежності, що характеризують вплив водоцементного відношення, витрат цементу, вмісту сталеві та базальтової фібри на міцність композиційних фібробетонів при стиску та розтяг при згині а також їх співвідношення. Отримано залежність вмісту добавки суперпластифікатора Melflux 2651f від тих же факторів, що дозволяє отримувати у всіх випадках рівнорухомі фібробетонні суміші.

Вивчена кінетика зміни рухомості фібробетонних сумішей у випадках застосування звичайного важкого і дрібнозернистого бетонів. Досліджені діапазони зміни рухомості з врахуванням факторів, що характеризують їх склад а також при введенні суперпластифікуючих добавок. Показано, що при оптимізації складу фібробетонних сумішей їх рухомість може залишатись практично стабільною протягом до 1 год. Для забезпечення збережуваності рухомості фібробетонної суміші та збільшення її тривалості, особливо при введенні суперпластифікаторів, ефективно застосовувати перемішування при її транспортуванні.

Вивчено вплив рухомості бетонної суміші та тривалості її віброущільнення на коефіцієнт розшарування (однорідності). Встановлено, що для фібробетону з композиційним дисперсним армуванням при однаковій тривалості віброущільнення розшарування є меншим, ніж для сталеві фібробетону. Експериментально підтверджено гіпотезу про можливість уникнення або суттєвого зменшення розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування.

Вивчено комплекс властивостей фібробетонів, що характеризують особливості їх структури, деформативність і морозостійкість. Встановлено, що показники, які характеризують середній розмір пор та однорідність порового простору фібробетонів суттєво покращуються при введенні добавок суперпластифікаторів, особливо полікарбоксилатного типу. Найкращі характеристики пористості проявляють фібробетони з композиційним дисперсним армуванням.

Експериментально визначено, що для фібробетонів, особливо композиційних, при збільшенні тривалості тверднення до 28 діб відношення міцності на розтяг при згині до міцності на стиск ($f_{c,tf} / f_{cm}$), що не прямо характеризує пружні властивості бетонів, зменшується значно в меншій мірі ніж для бетону без дисперсного армування. Зафіксоване суттєве підвищення відношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску у випадку введення до складу фібробетону базальтової фібри. При порівнянні аналогічних складів сталевібробетонів та поліармованих фібробетонів відзначається зростання цього відношення для композиційного фібробетону на 10...25%.

Усадочні деформації сталевібробетонів, як і у випадку звичайних бетонів, залежать від водовмісту бетонної суміші але, крім того, суттєвим фактором є також витрата фібри. Відзначено, що більший вміст фібри в фібробетоні з композиційним дисперсним армуванням нівелює його підвищену водопотребу. Зменшення усадочних деформацій і збільшення міцності на розтяг при згині таких бетонів приводить до відповідного збільшення модуля тріщиностійкості.

Дисперсне армування бетону можна розглядати як додатковий чинник, поряд із зменшеною капілярною пористістю, що додатково впливає на морозостійкість. Експериментальні дослідження показали, що для полідисперсно-армованих фібробетонів при витраті фібри 100 кг/м^3 досягається морозостійкість до 500 циклів, а з добавками суперпластифікаторів – 600...800. Встановлено, що полікарбоксилатний суперпластифікатор дозволяє отримувати фібробетони із морозостійкістю 800 і більше циклів.

Виявлено значне підвищення міцності фібробетонів в умовах динамічних навантажень. Встановлено, що найбільшою ударною міцністю володіє композиційний фібробетон, з вмістом сталеві фібри 120 кг/м^3 та базальтової фібри 4 кг/м^3). Максимальний показник ударної міцності склав $31,8 \text{ Дж/см}^3$ перевищуючи контрольне значення неармованого бетону більше ніж в 3,5 рази. Отримано математичну модель зміни ударної міцності композиційного фібробетону від рецептурно-технологічних факторів.

Встановлено зростання ударної в'язкості фібробетонів в 6...7 разів по відношенню до контрольного неармованого бетону в залежності від виду та вмісту армуючих елементів. Максимальне поглинання енергії удару забезпечують сталеві волокна в композиції з базальтовими.

В роботі запропоновано методики проектування і на їх основі розроблені склади фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням, що включають сталеву та базальтову фібру з високою ранньою міцністю та експериментально підтверджено технічні та економічні переваги полідисперсноармованих бетонів порівняно зі сталеві фібробетонами.

Здійснено випуск дослідно-промислових партій палів забивних у виробничо-технічних умовах підприємства ПАТ "Рембуд" (м. Рівне) а також бетонних сумішей для виготовлення високоміцних бетонів та фібробетонів в умовах підприємства ППФ "Торгбуд сервіс".

Отримані в роботі теоретичні і практичні результати щодо особливостей проектування складів фібробетонів впроваджено в навчальний процес при викладанні дисциплін "Проектування складів бетонів та розчинів різних видів", "Аналіз будівельно-технологічних задач та методи їх оптимального рішення" для студентів спеціальності 192 "Будівництво та цивільна інженерія".

Ключові слова: фібробетон, композиційне дисперсне армування, фібра, міцність, розшарування, проектування складів.

Список публікацій здобувача:

1. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Є.М. Бабич, В.В. Житковський, О.М. Бордюженко, С.В. Філіпчук, Д.В. Кочкар'юв, І.В. Ковалик, Т.В. Ковальчук, М.М. Скрипник // Рівне: НУВГП. – 2017. – 331 с.

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Дворкін Л.Й. Оптимізація складу високоміцного сталевіфібробетону / Л.Й. Дворкін, Т.В. Ковальчук // Строительные материалы и изделия. – 2016. – №2-3 (92). – С. 38-41.

3. Дворкін Л.Й. Вплив виду сталеві фібри на міцнісні властивості сталевіфібробетонів / О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Строительные материалы и изделия. – 2017. – №1-2 (94). – С. 25-29.

4. Ковальчук Т.В. Дослідження водопотреби фібробетонних сумішей з використанням суперпластифікаторів / Т.В.Ковальчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП. – 2017. – Вип. 34. – С. 18-26.

5. Бордюженко О.М. Розрахунок складів фібробетонів за критерієм мінімальної вартості / О.М. Бордюженко, Л.Й. Дворкін, Т.В. Ковальчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: Волинські обереги. – 2018. – Вип. 36. – С. 3-10.

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

6. Дворкин Л.И. Проектирование составов фибробетона с использованием экспериментально-статистических моделей / Л.И. Дворкин, В.В. Житковский, Ю.А. Степасюк, Т.В. Ковальчук // Технологии бетонов. – Москва, 2016. – № 11-12. – С. 29-37.

7. Дворкин Л.И. Технологические особенности фибробетонных смесей с использованием суперпластификаторов / Л.И. Дворкин, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Технологии бетонов. – Москва, 2018. – № 5-6. – С. 36-40.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Ефективність бетонів на вітчизняному суперпластифікаторі / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, М.М. Скрипник, Т.В. Ковальчук. // Будівництво України. – 2017. – №4. – С. 10-13.

9. Дворкін Л.Й. Вплив дисперсного армування на властивості бетону виготовленого на малоклінкерному шлакопортландцементі / Л.Й. Дворкін, Ю.О. Степасюк, Т.В. Ковальчук // Сб. трудов XIII Международной научно-практической конференции "Состояние современной строительной науки-2015". – Полтава, 2015. – С. 51-55.

10. Дворкін Л.Й. Вплив орієнтації сталюї фібри на механічні характеристики фібробетону / Л.Й. Дворкін, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Матеріали 6-ї міжнародної науково-практичної конференції "Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві". – Харків, 2016. – С 31-32.

11. Дворкін Л.Й. Ефективність дисперсного армування високоміцного дрібнозернистого бетону / Л.Й. Дворкін, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті". – Харків, 2017. – С. 81-83.

Патент:

12. Пат. 111661 Україна МПК В28В 1/52. Спосіб отримання бетону дисперсно-армованого орієнтованою сталюю фіброю / Л.Й. Дворкін, Є.М. Бабич, О.М. Бордюженко, В.В. Житковський, Т.В. Ковальчук // Заявник та патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u201603075; заявл. 25.03.2016; опубл. 25.11.2016; Бюл. № 22. – 4 с.

ABSTRACT

Kovalchuk T.V. High-strength fiber-reinforced concrete with composite dispersed reinforcement. – Qualification scientific work as a manuscript.

PhD thesis (Doctor of Philosophy) in Engineering sciences by specialty 05.23.05 “Building materials and products” (19 – Architecture and Construction). – National University of Water and Environmental Engineering, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Rivne, 2019.

The thesis is a theoretical and experimental study of high-strength fiber-reinforced concrete with composite dispersed reinforcement with improved characteristics.

An analytical review of literary sources devoted to the problems of obtaining fiber-reinforced concrete with improved operational characteristics was conducted. The issues related to the basic principles of disperse reinforcement are considered, as well as theoretical preconditions of the research are determined. On the basis of the performed analysis the hypothesis about the possibility of preventing fiber-reinforced concrete mixing and enhancing the uniformity of the structure of fiber-reinforced concrete due to the composition of disperse reinforcement with application in the optimal ratio of steel and basalt fibers for obtaining high-strength dispersed reinforced concrete with improved operational properties is formulated.

The characteristics of the source materials are described, the main methods of research used in the work are described.

On the basis of the analysis of a complex of experimental-statistical models of strength parameters of steel-fiber reinforced concrete, the efficiency of application for heavy and fine-grained concrete wavy steel fibers with increased surface of adhesion to concrete has been established. Quantitative dependencies were obtained that characterize the influence of the water-cement ratio and the fiber content on the strength of steel-fiber reinforced concrete at compressive and flexural tensile strength as well as their correlation. It is shown that application of fine-grained concrete on the studied types of fibers can increase the efficiency of the disperse reinforcement (ie, the

ratio of flexural tensile strength to compressive strength) by more than twice as compared to unreinforced concrete and by 20...25% compared to coarse-grained.

In this work the growth kinetics strength fiber concrete investigated and shown that the W/C within 0.35...0.4 in 1 day possible to achieve up to 50% of the compressive and tensile strength. When $W/C < 0.35$ the compressive strength of conventional heavy and fine-grained concrete within the characteristic of high-strength concrete and is 60...100 MPa.

The optimum content of steel fibers is determined by means of experimental statistical models in the conditions of providing maximum values of flexural tensile strength and, accordingly, of the efficiency of disperse reinforcement. With optimal values of the fiber content for different types of fiber-reinforced concrete, the coefficient of dispersion reinforcement efficiency increases by 25...40%.

The comparative studies of the methods of introducing fibers into the concrete mixture have been performed: with the preliminary introduction into the dry mixture and with the introduction into the finished concrete mixture. With sufficient duration and intensity of mixing, the strength parameters of steel-fiber concrete obtained with two methods of administration differ insignificantly. The choice of the method for the introduction of fibers should take into account the specific technological capabilities of the enterprise. It was established that the greatest uniformity of the distribution of fibers for fine-grained fiber-reinforced concrete is achieved when applying concrete mixtures with an mixture slump 15 cm or more.

Experimental studies have confirmed the effectiveness of the orientation of steel fibers under the action of a magnetic field, which allows to improve the strength characteristics of steel fiber-reinforced concrete. This effect becomes significant as the mobility of the concrete mixture increases and allows to improve the flexural tensile strength of fine-grained steel-fiber concrete up to 15%. It is shown that the influence of a magnetic field on the orientation of steel fibers is effectively combined with its vibration. A positive effect on the orientation of the fiber of superplasticizer supplements has been noted, due to increased thixotropy during the vibration process.

On the basis of the analysis of a complex of experimental and statistical models of strength parameters of fiber-reinforced concrete with composite dispersed reinforcement, the effectiveness of using a basalt fiber with a length of 12 mm in a complex with a wavy steel fiber, in optimal proportions. Quantitative dependences were obtained characterizing the influence of water-cement ratio, cement consumption, the content of steel and basalt fibers on the compressive and flexural tensile strength of composite fiber-reinforced concrete, as well as their ratio. The dependence of the content of the additive of the superplasticizer Melflux 2651f on the same factors is obtained, which allows to produce, in all cases, evenly-formed fiber-reinforced concrete mixes.

The kinetics of change in the mobility of fiber-reinforced concrete mixtures in cases of application of ordinary heavy and fine-grained concrete has been studied. The ranges of change in mobility were studied taking into account the factors characterizing their composition as well as using superplasticizing additives. It is shown that when optimizing the composition of fiber concrete mixes, their mobility can remain practically stable for up to 1 hour. In order to ensure the mobility of fiber concrete mixture and to increase its durability, especially when introducing superplasticizers, effectively mixing with its transportation.

The influence of the mobility of the concrete mixtures and the duration of its vibration compaction on the coefficient of bundle (homogeneity) is studied. It has been established that for fiber concrete with composite dispersed reinforcement with the same duration of vibration sealing, the bundle is smaller than for steel fiber concrete. Experimentally confirmed the hypothesis about the possibility of avoiding or significantly reducing the fiber concrete mixtures and enhancing the uniformity of the structure of fiber concretes due to composite dispersed reinforcement.

The complex of properties of fiber concretes, which characterize the features of their structure, deformability and frost resistance, is studied. It was established that the indicators characterizing the average pore size and the uniformity of the porous space of fiber concretes significantly improve when introducing superplasticizer additives,

especially the polycarboxylate type. The best characteristics of porosity are fiber concretes with composite dispersed reinforcement.

It has been experimentally determined that for fiber concretes, especially composite, with increasing the duration of hardening up to 28 days, the ratio of flexural tensile strength to compressive strength ($f_{c,tf}/f_{cm}$), which does not directly characterize the elastic properties of concrete, decreases significantly to a lesser extent than for concrete without dispersed reinforcement. A significant increase in the ratio of flexural tensile strength to compressive strength in the case of use in a fiber concrete of a basalt fiber. Comparing analogous steel fiber concretes and composite fiber concretes, the growth of this ratio for composite fiber concretes is noted at 10...25%.

The contraction deformations of steel fiber concretes, as in the case of ordinary concrete, depend on the mixture water content, but, moreover, the essential factor is also the consumption of fibers. It is noted that the higher content of fibers in fiber concrete with composite dispersed reinforcement reduces its increased water demand. Reducing contraction deformations and increasing the flexural tensile strength of such concrete leads to a corresponding increase in the crack-resistance modulus.

Disperse reinforcement of concrete can be considered as an additional factor, along with reduced capillary porosity, which further affects the frost resistance. Experimental studies have shown that for polydispersed reinforced fiber concretes at a flow of fibers of 100 kg/m^3 , a frost resistance of up to 500 cycles is achieved, and with superplasticizers added – 600...800. It was established that polycarboxylate superplasticizer allows to receive fiber reinforced concrete with a frost resistance of 800 and more cycles.

A considerable increase in the strength of fiber concretes in the conditions of dynamic loads was revealed. It was established that the composite fiber concretes possesses the greatest impact strength, with the content of steel fibers of 120 kg/m^3 and basalt fibers of 4 kg/m^3). The maximum impact strength was 31.8 J/cm^3 , exceeding the control value of non-reinforced concrete by more than 3.5 times. A mathematical model of the change in the impact strength of composite fiber concrete from the recipe-technological factors was obtained.

The increase of impact strength of fiber concrete in 6...7 times in relation to control non-reinforced concrete depending on the type and content of reinforcing elements is established. The maximum absorption of impact energy is provided by steel fibers in a composition with basalt fibers.

In the work, the design methods are proposed and the composition of fiber concrete with composite dispersed reinforcement is developed, which includes steel and basalt fibers with high early strength. Also, the technical and economic advantages of polydispersed reinforced concrete in comparison with steel fiber reinforced concrete have been experimentally confirmed.

The production of experimental industrial batch of piles in the conditions of the enterprise of PSC "Rivne Rembud" was made. Concrete mixtures for high-strength concrete and fiber reinforced concrete were manufactured in the conditions of PPF "Torhbud service".

The theoretical and practical results obtained in the work on the design features of fiber concretes compositions were introduced into the educational process in the teaching of disciplines "Designing of concrete and solution compositions of different types", "Analysis of construction and technological problems and methods of their optimal solution" for students of specialty 192 "Construction and civil engineering".

Key words: fiber-reinforced concrete, composite disperse reinforcement, fiber, strength, stratification, mix design.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	23
1.1. Досвід застосування фібробетонів в промисловому та цивільному будівництві.....	23
1.2. Особливості застосування мікрОВОЛОКОН для дисперсного армування бетонів	26
1.3. Вплив дисперсного армування на фізико-механічні характеристики фібробетонів	34
1.4. Композиційне дисперсне армування як спосіб покращення структури та властивостей фібробетону	38
1.5. Теоретичні передумови та наукова гіпотеза	40
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	43
2.1. Характеристика матеріалів, що були використані в дослідженнях	43
2.2. Основні методи досліджень.....	49
РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВИДУ ТА ВМІСТУ СТАЛЕВОЇ ФІБРИ А ТАКОЖ СПОСОБІВ ЇХ ВВЕДЕННЯ НА МІЦНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕФІБРОБЕТОНІВ	56
3.1. Вплив геометричних характеристик фібри.....	56
3.2. Вибір оптимального вмісту сталевОЇ фібри	66
3.3. Вплив процедури введення сталєних волокон у бетонну суміш.....	80
3.4. Покращення властивостей фібробетонів за рахунок орієнтування фібри.....	85
Висновки до розділу	94

РОЗДІЛ 4. МІЦНІСТЬ ФІБРОБЕТОНУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ З КОМПОЗИЦІЙНИМ ДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ	96
4.1. Вплив вмісту та співвідношення металевої та неметалевої фібри на міцність фібробетону	97
4.2. Дослідження впливу факторів складу на міцність дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням	101
4.3. Технологічні властивості фібробетонних сумішей	111
Висновки до розділу	128
РОЗДІЛ 5. ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ, ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ТА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ ФІБРОБЕТОНІВ З КОМПОЗИЦІЙНИМ ДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ	130
5.1. Пористість та водопоглинання	130
5.2. Деформативні властивості	134
5.3. Усадочні деформації	140
5.4. Морозостійкість.....	144
5.5. Динамічні характеристики фібробетонів	149
Висновки до розділу	156
РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ ВИСОКОМІЦНИХ ФІБРОБЕТОНІВ З КОМПОЗИЦІЙНИМ ДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ.....	158
6.1. Проектування складів фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням	158
6.2. Дослідно-промисловий випуск виробів на основі високоміцних фібробетонів	171
Висновки до розділу	177
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	178
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	181
ДОДАТКИ	200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Melflux 2651 F - суперпластифікатор полікарбоксилатного типу;
СП-1 (С-3) – суперпластифікатор нафталінформальдегідного типу;
Ц – цемент;
Щ – щебінь;
П - кварцовий пісок;
В – вода;
Ф – фібра;
СФ – сталева фібра;
БФ – базальтова фібра;
В/Ц – водоцементне відношення;
В – водопотреба бетонної суміші, л/м³;
 f_{cm} – міцність бетону (фібробетону) при стиску, МПа;
 $f_{c, f}$ – міцність бетону (фібробетону) на розтяг при згині, МПа;
ОК – осадка конуса, см;
 μ – об'ємний вміст фібри у фібробетоні, %;
 n – частка базальтової фібри в загальному об'ємі армування;
 $K_{н.г.}$ – нормальна густина цементу.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми. Однією із сучасних тенденцій в будівництві є використання фібробетонів, в т.ч. високоміцних. Різноманіття областей застосування виробів та конструкцій, що виготовляються з фібробетону, зумовлено тим, що порівняно із звичайним бетоном він характеризується у декілька разів більшою міцністю на осьовий розтяг та розтяг при згині, вищою тріщиностійкістю, стійкістю до ударних і вібраційних впливів тощо.

При цьому, в якості дисперсної арматури застосовують різні за складом, походженням, геометричними характеристиками та фізико-механічними властивостями волокна. Найчастіше в цементних бетонах застосовується сталева фібра. Її використання призводить до підвищення міцності бетону, в першу чергу на розтяг при згині, збільшує опір термічному впливу і стиранню, дозволяє досягти підвищення в'язкості руйнування. Однак, потенціал дисперсного армування сталеву фіброю реалізується не в повній мірі, зважаючи на її малу питому поверхню, невисоку адгезію до цементного каменю і недостатньо високу міцність самого бетону, що призводить до "висмикування" волокон при його руйнуванні.

Поряд з тим, суттєво в менших обсягах застосовується базальтова фібра. За міцністю вона перевершує сталь, і володіє, за рахунок малого діаметра волокон, набагато більшою питомою поверхнею зчеплення з цементним каменем, ніж сталева, маючи з ним хімічну спорідненість. При цьому відносне подовження при розриві базальтової фібри в два рази нижче, ніж сталевій, що дозволяє їй більш ефективно перешкоджати утворенню мікротріщин в бетоні при навантаженні.

Використання фібри різних видів, в бетонах класів В30-В50 призводить до незначного ефекту дисперсного армування. В рядових важких бетонах, ефект дисперсного армування знижується за рахунок низької міцності контактної зони цементного каменю з волокном. Також негативний вплив чинить при цьому крупний заповнювач, що перешкоджає рівномірному розподілу волокон в

матриці бетону і створення просторового каркаса дисперсної арматури. У зв'язку з цим, дисперсне армування як сталевим, так і базальтовим волокном ефективно застосовувати в високоміцних дрібнозернистих бетонах.

Як правило, використання дисперсного армування передбачає варіант моноармування, при якому керування властивостями бетону до певної міри обмежене, тоді як полідисперсне або композиційне дисперсне армування (армування одночасно декількома видами волокон з різними характеристиками) дає можливість управляти широким комплексом властивостей в одному композиційному матеріалі. Разом з тим, питання полідисперсного армування фібробетонів до теперішнього часу вивчене недостатньо, а наявна інформація часом свідчить про суперечливість отриманих результатів досліджень, що знижує обсяги застосування дисперсного армування.

Таким чином, питання композиційного дисперсного армування фібробетонів з метою підвищення їх техніко-економічної ефективності набуває особливої актуальності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота була виконана при кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП). Результати дисертаційних досліджень увійшли до держбюджетної науково-дослідної роботи "Високоміцні швидкотверднучі бетони і фібробетони та конструкції на їх основі для фортифікаційних споруд" (державний реєстраційний №0116U003759) відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України. Автор роботи був виконавцем.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка ефективної технології високоміцного дрібнозернистого фібробетону із композиційним дисперсним армуванням.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз інформаційних джерел, що стосуються основних вимог до високоміцних фібробетонів, впливу різних видів фібри та добавок на властивості фібробетонних сумішей та фізико-механічні показники фібробетонів;

- дослідити вплив сталеві фібри з різними геометричними параметрами на міцнісні показники фібробетонів на основі крупно- та дрібнозернистих бетонних сумішей та встановити її оптимальний вміст;

- обґрунтувати доцільність отримання фібробетонів із полідисперсним армуванням з використанням металевих та неметалевих волокон, встановити їх оптимальні співвідношення;

- вивчити вплив факторів складу фібробетонних сумішей з полідисперсним армуванням на їх технологічні властивості, в т.ч. при використанні водоредукуючих добавок;

- дослідити особливості структури, деформативні властивості та довговічність фібробетонів із композиційним дисперсним армуванням;

- встановити вплив факторів полідисперсного армування на динамічні характеристики фібробетонів;

- запропонувати методику проектування складів фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням, що дозволяє забезпечувати нормовані показники їх будівельно-технічних властивостей;

- виконати дослідно-промислове впровадження розроблених фібробетонів бетонів у виробництво високоміцних будівельних конструкцій.

Об'єкт дослідження – високоміцні фібробетони із композиційним дисперсним армуванням.

Предмет дослідження – вплив основних технологічних факторів, що характеризують склад високоміцних фібробетонів із композиційним дисперсним армуванням на їх фізико-механічні властивості та властивості фібробетонних сумішей.

Методи дослідження. При встановленні основних кількісних залежностей показників властивостей фібробетонів та сумішей використані математичні методи планування експериментів з отриманням та технологічним аналізом відповідних експериментально-статистичних моделей. Визначення фізичних, фізико-механічних та будівельно-технічних властивостей фібробетонів і сумішей

з композиційним дисперсним армуванням проведено відповідно до діючих нормативних документів і загальноприйнятих методик.

Наукова новизна одержаних результатів:

- теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість отримання високоміцних фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням, що містять сталеву та базальтову фібру в оптимальному співвідношенні;

- вперше встановлено ефективність введення базальтової фібри в композиції із сталеву з метою попередження розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів;

- вперше отримано комплекс експериментально-статистичних моделей показників властивостей полідисперсноармованих бетонів з використанням сталеві та базальтової фібри, що кількісно характеризують вплив основних технологічних факторів та ефекти їх взаємодії;

- вивчено особливості порової структури полідисперсноармованих бетонів та встановлено їх зв'язок із фізико-механічними властивостями;

- подальший розвиток отримала методологія проектування складів фібробетонів із заданими властивостями, в т.ч. із композиційним дисперсним армуванням.

Практичне значення одержаних результатів:

- запропоновано методики проектування і на їх основі розроблені склади фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням, що включають сталеву та базальтову фібру з високою ранньою міцністю та експериментально підтверджено технічні та економічні переваги полідисперсноармованих бетонів порівняно зі сталеві фібробетонами;

- запропоновані експериментально-розрахункові залежності водопотреби фібробетонних сумішей, в т.ч. при використанні водоредукуючих добавок, в широкому діапазоні рухомості бетонних сумішей а також відповідні поправки до них при Ц/В відношеннях, більших за критичне;

- з позицій забезпечення високих динамічних характеристик показано ефективність розроблених фібробетонів із композиційним дисперсним армуванням та запропоновано їх склади з оптимальним співвідношенням сталевोї та базальтової фібри;

- здійснено випуск дослідно-промислових партій палів забивних у виробничо-технічних умовах підприємства ПАТ "Рівненський завод надміцних залізобетонних конструкцій" а також бетонних сумішей для виготовлення високоміцних бетонів та фібробетонів в умовах підприємства ТОВ "ЛіхтнерБетон Рівне";

- основні положення дисертаційної роботи та результати експериментальних досліджень, зокрема методики розрахунку складів фібробетонів, використовуються в навчальному процесі Національного університету водного господарства та природокористування при викладанні дисциплін "Проектування складів бетонів та розчинів різних видів", "Аналіз будівельно-технологічних задач та методи їх оптимального рішення" для студентів спеціальності 192 "Будівництво та цивільна інженерія".

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних досліджень, обробці одержаних результатів та впровадженні результатів роботи у виробництво. Постановка завдання та формулювання основних положень і висновків проводились під керівництвом наукового керівника д.т.н., проф. Л.Й. Дворкіна.

Усі наукові результати дослідження дисертаційної роботи отримані автором особисто. В роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить (номери списку публікацій автора): [1, 2] – дослідження впливу факторів складу на властивості сталеві фібробетону; [3, 9, 11] – дослідження впливу різних видів фібри на міцнісні властивості фібробетонів та розробка їх складів; [5-7] – побудова математичних моделей та номограм а також їх аналіз; [8] – встановлення впливу кількості та виду пластифікуючих добавок на водопотребу фібробетонних сумішей; [10] – визначення параметрів орієнтації сталеві фібри; [12] – складання формули корисної моделі.

Всі експерименти, зазначені в роботі та публікаціях, виконані за безпосередньої участі здобувача.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи та її результати доповідались і обговорювались на конференціях: XIII Міжнародній науково-практичній конференції "Стан сучасної будівельної науки-2015" (Полтава, 2015); 6-й міжнародній науково-практичній конференції "Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві" (Харків, 2016); VI-й Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті" (Харків, 2017); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету водного господарства та природокористування (Рівне, 2015-2018 рр.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному науковому семінарі кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП (2018 р.), а також на міжкафедральному науковому семінарі з будівельних матеріалів та виробів НУВГП (2019 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 1 колективна монографія, 6 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав, 2 – в наукових періодичних виданнях інших держав, що включені до міжнародних наукометричних баз даних (Google Scholar, РИНЦ), 3 публікації у матеріалах міжнародних конференцій, 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 137 сторінках друкованого тексту та складається із вступу, шести розділів, висновків. Повний обсяг дисертації становить 211 сторінок та включає 48 таблиць, 71 рисунок, список використаних джерел із 179 найменувань на 19 сторінках і 4 додатки на 12 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

З підвищенням міцності бетону росте і його крихкість, знижуються пластично-деформаційні властивості при короткочасному й тривалому навантаженні, що приводить практично до миттєвого руйнування бетону при досягненні ним граничного стану. Варіантом вирішення цієї задачі можна вважати дисперсне армування бетону фіброю, що дозволяє істотно підвищити його питому міцність на розтяг і згин, тріщиностійкість, стійкість до ударних і вібраційних впливів, опір стиранню тощо.

1.1. Досвід застосування фібробетонів в промисловому та цивільному будівництві

Перші відомості про фібробетони з'явилися на початку 20 століття і пов'язані з ім'ям російського інженера В.П. Некрасова [1], який працював над збільшенням опору бетону навантажень в стислих і розтягнутих шарах споруди шляхом додавання в бетон обрізків тонкої залізного дроту.

Значного розвитку і застосування фібробетон отримав в Японії. Вже у вісімдесятих роках минулого століття кількість використаної в цій країні сталеві фібри досягло 3000 т, з яких 2500 т було виготовлено з вуглецевої і близько 500 т з нержавіючої сталі [2]. Японським інститутом бетону розроблені методи випробування фібробетону. Крім того, в рамках Японської асоціації по цементу в 1960 р. був заснований комітет по вивченню фібробетону.

Досвід таких країн, як США, Великобританія, Німеччина, Франція і Австралія, переконливо довів техніко-економічну ефективність застосування фібробетону в будівельних конструкціях [3, 4, 5, 6, 7]. У будівельній практиці США сталеві фібробетон широко застосовують для монолітних підлог промислових будівель, покриттів в аеропортах, територій і доріг з важкими транспортними навантаженнями [8].

Серед зарубіжного досвіду слід виділити застосування фібробетонів в дорожньому і тунельному будівництві, будівництві морських платформ і гребель, а також в облаштуванні підлог промислових будівель, терміналів і т.п. Вважається за доцільне застосування сталеві фібробетону в каркасних конструкціях будівель, особливо при можливих сейсмічних впливах. Найбільш цікавими прикладами застосування сталеві фібробетону є: конструкції перегінних тунелів метрополітену в Осло (Норвегія); кріплення гідротехнічного тунелю діаметром 2,34 м в Карсінгтоні (Великобританія); тунель Хеггура і газопровідні тунелі під дном Північного моря (Норвегія); залізничні тунелі в Канаді; колекторні тунелі метрополітену в Гамбурзі (Німеччина) і Ліоні (Франція); автодорожній тунель протяжністю 6,63 км на глибині до 1 км "Енасан-2" (Японія) [4].

Фірми "Alfanor" і "Norcem Cement" (Норвегія) виготовили дослідні партії сталеві фібробетонних труб діаметром 800 мм, призначених для відводу промислових та інших стічних вод [10]. В Австралії однією з основних областей застосування сталеві фібробетону є влаштування покриттів з інтенсивним рухом людей і транспорту (підлоги цехів заводів і фабрик, пралень, дорожні покриття), а також дорожніх покриттів з інтенсивним рухом транспорту [10-11]. У Німеччині понад 25% індустріальних підлог зведено зі сталеві фібробетону [9].

В останні роки в практиці будівництва все більше застосування знаходять фібробетони з фібровим армуванням із синтетичних волокон, в т.ч. високоміцними і високомодульними, корозійностійкими в багатьох середовищах [4, 9].

В Україні розроблена настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону (ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016) [12]. Даний стандарт визначає методи розрахунку, проектування та виготовлення дисперсно-армованих фібробетонних конструкцій промислових, громадських будівель та споруд. Фібробетонні конструкції повинні виготовлятися з важкого або дрібнозернистого бетону, армованого сталеві або базальтовою фіброю, в тому числі в сполученні зі сталевію стрижневою арматурію.

Дослідження Донецького ПромбудНДІпроекту з питань впливу поліпропіленової фібри на властивості дорожнього бетону показали [13], що введення до складу бетону поліпропіленового волокна збільшує його міцність на стиск до 20%, на згин – до 25%, початковий модуль пружності фібробетону при цьому на 15% нижчий, ніж у звичайного бетону.

За даними інституту "КиївЗНДІЕП" [14] розроблений конструкційний склофібробетон з високими фізико-механічними характеристиками, що дозволяє рекомендувати його до використання конструкцій різного призначення.

Дані ДерждорНДІ [15] свідчать про збільшення тріщиностійкості таких бетонів, що дуже важливо для елементів дорожніх та аеродромних покриттів.

Дисперсне армування набуває важливого значення в антисейсмічному будівництві за рахунок здатності, армованих синтетичним волокном, конструкцій сприймати значні згинальні моменти, набуваючи таких властивостей, як вища деформативність бетонної конструкції, висока тріщиностійкість [16].

Існуючий досить широкий досвід застосування фібробетону у будівництві дозволяє сформувавши великий перелік ефективно апробованих конструкцій з фібробетонів на основі сталевих, скляних, базальтових і поліпропіленових фібри [6, 18, 19, 20].

В останні роки досить ефективно ведеться будівництво зі сталевих фібробетонів індустриальних підлог. При цьому знижуються матеріало- і трудомісткість будівництва, обсяги земляних робіт, вартість будівництва, підвищується якість, експлуатаційна надійність і збільшується міжремонтний ресурс конструкцій підлоги.

1.2. Особливості застосування мікрОВОЛОКОН для дисперсного армування бетонів

Забезпечення заданих показників якості фібробетонів можливе лише за умови забезпечення раціонального вибору типів волокон, визначення їх оптимального дозування і правильного приготування суміші. Область застосування волокон різних типів і їх ефективного використання для дисперсного армування визначається двома міжнародними стандартами – EN14489 і ASTM C 116-03 [21, 22].

Американський стандарт ASTM C 116-03 визначає 3 загальних класи армованого бетону:

- 1 - армований сталевими волокнами бетон або торкретбетон;
- 2 - армований скловолоконном бетон або торкретбетон;
- 3 - армований полімерними волокнами бетон або торкретбетон.

Британський (європейський) стандарт BS EN14489 розділяє полімерні волокна на два основні класи залежно від їх розмірів:

- Клас 1: мікрОВОЛОКНА;
- Клас 1 а: мікрОВОЛОКНА <0,3 мм в діаметрі;
- Клас 1 b: мікрОВОЛОКНА <0,3 мм в діаметрі;
- Клас II: макрОВОЛОКНА > 0.3 мм в діаметрі.

В даних нормативах відзначено, що волокна з діаметром понад 0,3 мм слід застосовувати в конструкціях, до яких пред'являються високі вимоги але міцності на розтяг при згині.

В якості фібри можуть служити різні типи волокон зі сталі, скла, синтетичних матеріалів, азбесту, вуглецю та ін. (табл. 1.1) [23].

Найбільш поширені фібробетони на портландцементі, армовані сталевим волокном – **сталеві фібробетони**. Сталеве волокно звичайно представлене відрізками дроту, у тому числі з відпрацьованих канатів. Фібри можуть мати різний поперечний переріз – круглий, овальний й ін. розмірами від 0,2 до 1,6 мм і довжину від 10 до 160 мм. Поверхня фібр може бути профільована, оброблена травленням і, як виключення, гладкою. Кількість фібр, що вводяться в бетон, у

більшості випадків коливається від 0,5 до 2% по об'єму. Введення в бетон сталевих фібр у кількості 1...1,5% по об'єму збільшує його міцність на розтяг до 100%, міцність на вигин на 150...200%, міцність на стиск підвищується на 10...25%.

Таблиця 1.1 – Галузі застосування різних видів волокон

Тип волокна	Галузь застосування
Скло	Збірні панелі, облицювання стін, каналізаційні труби, тонкі бетонні покриття дахів, суха штукатурка для бетонних блоків
Сталь	Ніздрюваті бетонні елементи покриття, дорожні покриття, мостові настили, вогнетривкі матеріали, бетонні труби, злітно-посадочні смуги аеродромів, ємності високого тиску, вибухостійкі споруди, основи верстатів, портові споруди, облицювання тунелів, конструкції корабельного корпусу
Поліпропілен, нейлон	Фундаментні палі, попередньо напружені палі, лицевальні панелі, плавучі елементи для проходів і причалів у портах, дорожній ремонтний матеріал, привантажі для підвідних труб
Азбест	Листи, полотно, труби, плити, вогнетривкі й ізоляційні матеріали, каналізаційні труби, гофровані і гладкі покрівельні листи, облицювання стін
Вуглецеві	Гофровані елементи перекриттів, одинарні і подвійні вигнуті мембранні структури, корпуси човнів, настили будівельних лісів
Поліамід	Аналогічно вуглецевим волокнам
Бамбук	Будівельні настили
Слюдяні луски	Частково заміщають азбест у цементних настилах, бетонних трубах; ремонтні матеріали
Рослинні волокна: кокосової пальми, сизала джуту, аквара, слонової трави	Дешеві покрівельні матеріали і лицевальні панелі

За рахунок більш високої тріщиностійкості сталеві фібробетон відрізняється підвищеною в 1,5...2 рази морозо-, жаро- і вогнестійкістю, водонепроникністю. Цінними якостями сталеві фібробетону є підвищена зносостійкість, ударна і динамічна стійкість. Так, зносостійкість сталеві фібробетону збільшується на 30...50%, а опір удару в 10...12 разів [23].

При значних прольотах і навантаженнях у конструкціях доцільне об'єднання фібрового і стержневого армування, тобто застосування комбінованого армування.

Сталевими, як і неметалічними волокнами, армують, як правило, дрібнозернисті бетони або цементний камінь. Дисперсне армування ефективно запобігає розвитку волосяних тріщин тільки при відстані між волокнами не більше 10...12 мм. Для розрахунку коефіцієнта відстані між волокнами (S) для дисперсно-армованих композитів запропонований ряд формул. Найбільш проста з них наведена нижче [23]:

$$S = \sum V_1 / V_f, \quad (1.1)$$

де V_1 — об'єм одного волокна; V_f — об'ємний відсоток волокна.

Зі зменшенням значення коефіцієнта S збільшується міцність композитів при розтягу і згині.

Важливою проблемою при використанні сталевих фібри у бетоні є можливість утворення так званих "їжаків" та нерівномірний розподіл сталевих фібри, що вимагає необхідність спеціальних пристосувань для рівномірної подачі фібри в бетонну суміш [23, 24].

Проблему підвищеного "комкування" у структурі бетону сталевих фібри вирішується шляхом застосування фрезерованої фібри, конфігурація якої, її розміри й технічні характеристики забезпечують її ефективну роботу в дисперсно-армованому бетоні [25]. Разом з тим, через високі норми витрати сталевих фібри доводиться шукати більш доступні способи армування бетонів.

Незважаючи на очевидні переваги сталевих фібробетону можна відзначити ряд важливих проблем, що виникають в процесі його виготовлення та формуванні виробів та конструкцій:

- висока вартість сталевих фібри, особливо малих діаметрів;
- достатньо високі витрати при порівняно низькому ступені насичення бетонних матриць фібрами такою типу, що обмежує подальше покращення фізико - механічних і експлуатаційних властивостей сталевих фібробетону;

- складність забезпечення однорідності структури фібробетону та недопущення розшарування суміші в процесі її транспортування та укладання.

Альтернативним варіантом сталевій фібрі можуть слугувати мінеральні та хімічні волокна, що володіють високими фізико - хімічними та експлуатаційними властивостями. Найбільшого поширення набули скляні, базальтові і полімерні волокна, зважаючи на їх доступність і прийнятну вартість. Основні властивості і показники металічних та неметалічних волокон наведені в табл. 1.2 [26-28].

Таблиця 1.2 – Види фібр, що використовуються для виготовлення фібробетону

Фібра (волокно)	Густина, г/см ³	Міцність на розтяг, R _f , МПа × 10 ³	Модуль пружності, E _f , МПа × 10 ³	Подовження при розриві, %
Металева				
Сталева	7,8	0,5-1,50	190-210	2-6
Неметалева високомодульна				
Азбестова	2,6	0,9-3,1	68-70	0,6-1
Скляна	2,6	1,8-3,9	70-80	1,5-3,5
Базальтова	2,6	1,6-3,2	100-130	1,4-3,6
Арамідна	1,4	2,9-3,5	75-110	1,4
Вуглецева	2	2,5-4	200-700	1,0-1,6
Карбонова	1,63	1,2-4,0	280-380	2-2,2
Полімерна низькомодульна				
Поліамідна	0,90	0,72-0,9	1,9-5	5-20
Поліпропіленова	0,9	0,4-0,77	3,5-8	10-25
Нейлонова	1,1	0,77-0,84	4,2-4,5	16-20
Віскозна	1,20	0,66-0,7	5,6-5,8	14-16

Найважливішою характеристикою фібри є її жорсткість, яка характеризується модулем пружності E_f. За величиною модуля пружності всю фібру доцільно класифікувати за двома групами. До першої групи належить високомодульна фібра з E_f = (70...250)·10³ МПа, що включає сталеву і неметалеву

види фібри на основі базальтових, азбестових і скляних волокон. До першої групи належать також такі специфічні модифікації, що знайшли в останні роки застосування у виробництві фіброармованих пластиків (ФАП), тканинних рулонних матеріалів, композитних стрічок, як вуглецеві, арамідні, карбонові волокна з $E_f = (200...700) \cdot 10^3$ МПа, що застосовуються для посилення і ремонту будівельних конструкцій, в першу чергу залізобетонних.

Високомодульна фібра є одночасно високоміцною, і вона здатна забезпечити значне зміцнення фібробетону по відношенню до вихідного бетону-матриці при значному підвищенні тріщиностійкості (за утворенням і шириною розкриття тріщин) як за рахунок високого співвідношення модулів пружності фібри і бетону $E_f/E_b \sim 7...30$, так і за рахунок високого співвідношення їх міцностей (10...100 для міцності бетону на стиск, 100...1000 для міцності на розтяг). Фібробетон на основі високомодульної фібри забезпечує також підвищену ударну стійкість, морозостійкість, водонепроникність, стиранність.

Друга за жорсткістю група – низькомодульна фібра виготовляється на полімерній основі. Вона має модуль пружності $(2...10) \cdot 10^3$ МПа, що нижче за жорсткість фібри першої групи приблизно на два порядки. Ця фібра чинить мінімальний позитивний вплив на статичну міцність, але забезпечує в значній мірі зниження усадки, підвищує ударну в'язкість і морозостійкість бетону, забезпечує водоутримуючу здатність бетонної суміші [29-32].

Властивості скловолокна залежать від багатьох факторів, у тому числі від способів їх отримання і хімічного складу вихідного матеріалу. За своїм хімічним складом промислові скла і скловолокна діляться на дві групи:

- безлужні (вміст лужних оксидів не більше 1...2%);
- лужні (вміст лужних оксидів 10...15%).

Визначено, що скляні нитки діаметром до 10 мкм по міцності відповідають високовуглецевому холоднотягнутому дроту, при цьому легші за нього в 3,5 рази. Однак, основною причиною, яка стримує використання скляних волокон в якості армуючого матеріалу для бетонних матриць, є їх порівняно низька стійкість до впливу середовища гідратуючого цементу. Досліди доводять, що всі

силікатні стекла незалежно від їх хімічного складу активно вступають у взаємодію з розчином $\text{Ca}(\text{OH})_2$, поглинаючи з нього CaO [33-35]. Тому проблема оптимізації хімічного складу скловолкна і збільшення нею лугостійкості залишається актуальною.

Широке поширення серед синтетичних волокон одержала **поліпропіленова фібра**. Поліпропіленове фіброволокно виготовляється безперервним методом з гранул чистого поліпропілену шляхом екструзії і витяжки при нагріванні.

Відомо, що поліпропіленові волокна не піддаються корозії під впливом лужного середовища при гідратації портландцементу. Однак волокна даного тину мають низьку змочуваність, отже, і погану адгезію до цементного каменю. Забезпечення зчеплення фібри з бетоном досягається більшою мірою тільки за рахунок сил механічного заанкерування.

Згідно з літературними даними [36-39] введення синтетичних волокон в бетонну суміш не призводить до помітного підвищення міцності бетону на осьовий розтяг, розтяг при згині і стиску при дії статичних навантажень.

В той же час, дослідження [9, 39-44] показують, що застосування синтетичних волокон в якості армуючого матеріалу зазвичай призводить до зменшення усадочних деформацій цементної матриці, підвищенню морозостійкості, стирання, атмосферостійкості і значного збільшення міцності і показників в'язкості руйнування бетонів на всіх структурних рівнях. Так, у дослідженнях С. М. Толмачова [45] показано, що для фібробетону з розміром зерен заповнювача 20 мм поєднання фібри з довжиною волокон 6 і 12 мм і діаметром 17...21 мкм, при загальній її витраті 0,9...1,0 кг на 1 м³ бетонної суміші дає істотний приріст міцності. При цьому для класів бетону В30...В40 міцність на розтяг при згині зростає на 30%, на стиск - на 16%. При введенні фібри довжиною 12 мм при витраті 1,0 кг/м³ міцність на стиск у віці 28 діб становить 49,67 МПа, на розтяг - 6,36 МПа.

Одним з ефективних різновидів мінеральних волокон для дисперсного армування бетонів є **базальтове волокно** [46, 47]. Воно характеризується високою міцністю на розтяг 1600...3200 МПа (табл. 2). Основними

особливостями фібробазальтобетону є його висока міцність при всіх видах напружених станів і здатність витримувати значні деформації в пружному стані. При цьому відносна деформація цементного каменю без утворення тріщин досягає 0,7...0,9 %, що в 35...45 разів перевищує граничне видовження неармованого каменю [48]. Значне збільшення деформативності і міцності цементного каменю відбувається за рахунок усунення базальтовими волокнами впливу концентрації напружень в місцях, ослаблених структурними дефектами (раковинами, мікротріщинами). Базальтове волокно хімічно інертне, тому бетони, армовані базальтовими волокнами, застосовують при будівництві морських споруд, в архітектурному і декоративному бетонах [49]. У дорожніх покриттях волокно захищає бетон і арматуру від проникнення агресивних речовин, а також підвищує залишкову міцність і стійкість до заморожування-відтавання, підвищує шорсткість поверхні.

Використання базальтових волокон, для дисперсного армування фібробетонів є актуальним у зв'язку з високими фізико-механічними властивостями одиничних волокон і більш низькою густиною цих волокон в порівнянні зі сталевими.

Проведений аналіз літературних джерел, присвячених питанням теоретичних основ дисперсного армування, корозійної стійкості базальтового волокна в лужних середовищах, дозволив встановити, що високі фізико-механічні характеристики матеріалу головним чином визначаються спільною роботою волокна із цементною матрицею, а також залежать від складу бетону, технології його виготовлення, виду і активності застосовуваного цементу, виду і вмісту фібри, способу її розподілення в бетонній суміші, виду і кількості пластифікуючих добавок [28, 49-56].

Дослідження групи вчених на чолі з Рабиновичем Ф.Н. [57] виявили високий ступінь руйнування мінерального волокна в розчині Ca(OH)_2 . Наприклад, алюмоборсилікатне моноволокно витримане протягом 12 місяців в насиченому розчині вапна втратило за їхніми даними 72% своєї початкової міцності. Однак дослідники відзначають високу стійкість базальтового волокна,

міцність якого після витримки в аналогічних умовах зменшилася лише на 26-32% [57-58]. Автори також відзначають тенденцію до загасання реакції базальтових волокон з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в часі. Найбільш інтенсивно процеси вилуговування спостерігаються протягом перших трьох місяців.

Встановлено [59], що міцність базальтових волокон в лужному середовищі портландцементу може зменшуватися на 5...10% тільки в перші 3...6 місяців, а руйнування поверхні волокон відбувається на глибину не більше 4 мкм. За рахунок утворених раковин міцність зчеплення цементного каменю і волокна збільшується, що зумовлює зростання міцності самого виробу. При використанні волокон діаметром понад 100 мкм їх міцність не змінюється.

Пащенко О.О. зі співавторами [60] стверджують про більш високу стійкість базальтових волокон в агресивних середовищах цементного каменю і насиченого розчину вапна. Після трирічних випробувань базальтового волокна міцність його зменшилася лише на 12...15%.

Наведені вище дані дозволяють виділити основні закономірності, які можуть вважатися загально визначеними.

Властивості фібробетону визначаються видом і якістю застосовуваних волокон і бетону, їх кількісним співвідношенням і багато в чому залежать від стану контактів на межі поділу фаз.

Істотне підвищення міцнісних характеристик композиту у порівнянні з вихідним бетоном (зі збереженням досягнутого рівня в часі) забезпечується використанням високотехнологічних волокон, хімічно стійких стосовно матриці й з більшим, ніж у неї, модулем пружності.

Вид волокон, їх відносна довжина (l/d) і процентний вміст у суміші повинні призначатися, виходячи з вимог до виробів і конструкціям з урахуванням прийнятої технології. Відхилення від оптимальних значень зазначених параметрів у більшу або меншу сторону знижує ефективність дисперсного армування.

При оптимальних параметрах армування введення волокон сприяє поліпшенню структури й властивостей вихідного бетону, підвищенню його стійкості й довговічності.

1.3. Вплив дисперсного армування на фізико-механічні характеристики фібробетонів

Міцність. Фібробетон характеризується підвищеною міцністю на розтяг. При введенні 3 % за обсягом сталевих фібр зафіксоване [61] збільшення міцності в 2,5 рази, при 1,5 % – в 1,5...2 рази в порівнянні з неармованим бетоном. Аналогічні дані отримані в [62]. За результатами [63], збільшення міцності на розтяг при насиченні 1,2 % становить 50 %.

Наведені в літературі дані про вплив ступеня дисперсності армуючих волокон на міцність фібробетону при стиску суперечливі. Так, у роботах [61, 63, 64] констатується істотне збільшення міцності сталеві фібробетону при зменшенні діаметра армуючих волокон. При цьому доходять висновку про існування оптимального діаметру 0,3 мм. Відзначається також, що волокна діаметром 0,5 мм менш ефективні. За даними [65], найбільш раціональною є фібра діаметром 0,2...0,4мм. Разом з тим в [66] відзначено, що міцнісні властивості матеріалу мало залежать від діаметру армуючих волокон. В [110] запропоновано використовувати в якості характеристики фібрового армування величину:

$$K = \mu_o \frac{\ell}{d}, \quad (1.2)$$

де μ_o – коефіцієнт об'ємного армування ℓ - довжина фібри, мм d – діаметр фібри, мм.

Експериментально встановлене, що однаковим значенням K , при інших рівних умовах, відповідають однакові значення міцності сталеві фібробетону незалежно від абсолютних значень діаметрів фібр. За даними авторів зазначених робіт це є наслідком збільшення коефіцієнта орієнтації K_{op} за рахунок збільшення довжини фібр, і поліпшення умов їх анкеровки, зі збільшенням

діаметру внаслідок надання їм періодичного профілю. На підставі проведених досліджень [67, 110], рекомендується, для конструкцій, граничний стан яких лімітується несучою здатністю, застосовувати фібри діаметром 1,0...1,2 мм.

Динамічна міцність. Відмінною рисою фібробетонів є підвищена структурна в'язкість, завдяки якій вони набувають значної стійкості при динамічних навантаженнях, у тому числі ударних. Висока ударна міцність – одна із найбільш важливих властивостей фібробетонів, що обумовило їх застосування у важких експлуатаційних умовах.

Численні дослідження а також дані натурних випробувань конструкцій, переконливо доводять, що динамічна стійкість фібробетону в результаті дисперсного армування зростає в декілька раз [9, 68, 69]. При цьому відзначається, що ступінь підвищення опору ударним та іншим динамічним впливам певним чином залежить від виду та геометричних характеристик використовуваних волокон, їх кількості в суміші, дисперсності мінеральних компонентів у складі матриці, а також від технології виготовлення виробів [70-72]. Одночасно встановлено, що при певному об'ємному насиченні важкого бетону дисперсною арматурою (у межах $\mu_0 = 1...3\%$) застосування низкомодульних синтетичних волокон забезпечує одержання матеріалу, що не поступається за ударостійкістю сталеві фібробетону [9, 25, 73, 74] і при цьому більш економічного. Поряд з тим, стверджується [75], що найбільш ефективним видом фібри, з позицій підвищення ударостійкості бетону, є високомодульні волокна. Останній висновок підтверджується результатами досліджень [73, 76], згідно з якими введення до складу дрібнозернистого бетону капронових фібр із модулем пружності $E = 4650$ МПа в кількості 1...2% за об'ємом приводить до збільшення ударостійкості матричного матеріалу в 2...5 раз, у той час як у ніздрюватому бетоні, стосовно якого капронові волокна є високомодульними, підвищення опору поздовжньому удару при тому ж рівні армування може досягати 10 раз.

Динамічну міцність (ударостійкість) пропонується оцінювати енергією, що затрачена на утворення тріщин:

$$A_{yd} = \frac{PgHn}{L_{тр}}, \quad (1.3)$$

де P – маса копра, що здійснює удар; g – прискорення вільного падіння; H – висота падіння копра; n – кількість ударів; $L_{тр}$ – довжина утворених тріщин (усереднене значення за всіма гранями зразка).

Тріщиностійкість. Дисперсне армування високомодульними волокнами: сталевими, азбестовими, вуглецевими, скляними збільшує тріщиностійкість бетону [77-83]. За результатами [9] при введенні сталевих фібр $0,25 \times 25,4$ мм ($d \times l$) у кількості 2,3 % за об'ємом навантаження в момент утворення першої тріщини подвоюється в порівнянні зі зразками з неармованого бетону, при кількості волокон 4 % за об'ємом зростає приблизно в 3 рази, за даним [61] в 2, 5 рази.

В [84, 85] також відзначається збільшення міцності в момент утворення тріщини в порівнянні з контрольними зразками на 35...80 % в міру збільшення вмісту фібри від 1,25 % до 2,5 % за об'ємом.

Не менш показовими є результати [86], з яких випливає, що тріщиностійкість при статичному навантаженні в 1,5...1,8 рази перевищує границю міцності неармованого бетону, а згідно [62] в 1,8...1,86 рази.

Необхідно відзначити, що тріщиностійкість фібробетону істотно залежить від рівня дисперсного армування, обумовленого величиною діаметра використовуваних фібр. Так, у випадку армування бетону сталевими фібрами $0,3 \times 25$ мм при армуванні 0,02 % за об'ємом [67] момент тріщиноутворення збільшується в 1,25 рази в порівнянні з бетоном, армованим волокнами $1,25 \times 120$ мм. У зв'язку із цим для конструкцій до яких пред'являються підвищені вимоги по тріщиностійкості, рекомендується застосовувати фіброву арматуру діаметром $0,2...0,5$ мм. До аналогічного висновку приходять автори роботи [87].

Пояснюючи механізм значного підвищення тріщиностійкості при зменшенні діаметра фібр в [98], доходять висновку, що це відбувається за рахунок істотного зниження піддатливості волокон у момент виникнення тріщини в бетоні у зв'язку зі збільшенням їх кількості на одиницю площі розрахункового перерізу.

Високомодульні волокна малого діаметру впливають на початкову ширину розкриття тріщин. Так встановлено [83], що для бетону, армованого фібрами діаметром 0,3 мм тріщини в момент їх утворення носили характер місцевих розривів шириною 1,5...3 мкм та довжиною 1...3 мкм. У випадку ж використання фібр діаметром 0,9 мм відразу утворювалися тріщини шириною 7...10 мкм.

Порова структура, морозостійкість, корозійна стійкість. Дисперсне армування забезпечує покращення порової структури бетону, підвищує його морозо- і корозійну стійкість. Ступінь покращення зазначених характеристик суттєво залежить від геометричних параметрів армуючих волокон [89].

Так, введення в бетон фібрової арматури приводить до збільшення однорідності матеріалу й утворення більш дрібнопористої структури із замкненими порами. Ступінь цього впливу зростає зі зменшенням діаметра фібри і збільшенням їх кількісного вмісту до межі насичення, що визначається можливостями конкретної технології виготовлення фібробетону [90-92]. Використання ж крупної фібри, як свідчать результати наведені в [93], впливає на порову структуру бетону в значно меншій мірі.

Враховуючи, що захисний шар на дисперсній арматурі відсутній, корозійна стійкість волокон у фібробетоні визначається переважно тріщиностійкістю й захисними властивостями бетону. При цьому, захисні властивості бетону характеризуються його проникністю й залежать від порової структури. Як було показано раніше, покращення порової структури й підвищення тріщиностійкості проявляється більшою мірою при використанні дрібнодисперсної фібри. Цей висновок підтверджується роботами [90, 91, 94], авторами яких не рекомендується використовувати сталеву фібру діаметром понад 0,5 мм, якщо матеріал експлуатується в середовищі, агресивному щодо металу.

Підвищення морозостійкості бетону також перебуває в прямій залежності від діаметра використовуваної фібри [95]. В експериментах застосовувалося армування дрібнозернистого бетону відрізками сталевого дроту 0,3×25 мм і 0,7×70 мм. Об'ємний відсоток армування був прийнятий 1...2%. Зниження на 15% міцності зразків з бетону відбулося через 7 циклів, а зразків армованих фібрами діаметром

0,3 мм відповідно через 50 і 40 циклів заморожування при температурі -50°C . Морозостійкість бетону за рахунок дисперсного армування збільшилася в 7 разів. У випадку ж використання фібр діаметром 0,7 мм при $\mu = 1\%$ морозостійкість збільшилася в 2 рази, при $\mu = 2\%$ – трохи більше, ніж у два рази, але меншою мірою, ніж у першому випадку.

1.4. Композиційне дисперсне армування як спосіб покращення структури та властивостей фібробетону

Ступінь позитивних змін властивостей бетону при його дисперсному армуванні і характеристик конструкцій на його основі головним чином визначається видом і властивостями використовуваних волокон, співвідношенням і ступенем взаємодії між ними. Тісний взаємозв'язок армуючих волокон з бетонною матрицею, крім її власної активності, забезпечується величиною поверхні розділу, яка, в свою чергу, залежить від ступеня насичення бетону волокнами, їх геометричних характеристик і поверхневої енергії [79].

З теоретичних передумов, можна припустити, що найбільшого позитивного ефекту в плані поліпшення структури і властивостей фібробетонів можна досягти в результаті композиційного дисперсного армування при оптимальному поєднанні двох і більше видів фібр різного складу, з різними розмірами, міцністю і пружно-пластичними характеристиками. Метою композиційного армування є створення такого матеріалу, який зберігаючи позитивні особливості, виключав би недоліки, що мають місце у варіанті моноармування.

Перевагами композиційного дисперсного армування (поліармування) можуть бути:

- забезпечення більшої однорідності структури фібробетону, що в свою чергу створить передумови для досягнення більших значень міцності, ніж у випадку моноармування;
- уникнення або суттєвого зменшення розшарування фібробетонної суміші в процесі її приготування, транспортування та укладання;

- цілеспрямоване регулювання комплексу фізико-механічних властивостей фібробетону в більш широких межах, ніж при моноармуванні;
- можливість покращення показників довговічності та експлуатаційних характеристик фібробетону.

Проведений літературний огляд показує, що питання використання композиційного дисперсного армування для покращення властивостей фібробетонів та сумішей вивчалось недостатньо. Окремі дослідження проведені за цим напрямком дозволяють зробити висновок про перспективність використання полідисперсного армування [96-98] .

В роботі [97] показана можливість композиційного дисперсного армування з використанням сталеві та поліпропіленові фібри. Відзначається, що при оптимальному їх співвідношенні і вмісті стає можливим досягнення більшої однорідності композиту, зменшення відкритої пористості, зменшується також ймовірність комкування волокон при перемішуванні суміші.

Модель багаторівневого дисперсного армування самоущільнюваного бетону представлена в роботі [99]. Структура такого фібробетону формується на двох рівнях: на макрорівні – базальтовим волокном, на мікрорівні – за рахунок утворення волокнисто-голчастих субмікроармувальних новоутворень кристалогідратів, які підвищують опір руйнуванню при реалізації явища "самомікроармування".

На думку Голанцева В.А. [98], принцип полідисперсного армування ґрунтується на тому, що застосована для цього фібра з різними геометричними параметрами, забезпечує формування просторових комірок на різних рівнях структури бетону. Більш крупні комірки накладаються на більш дрібні, тоді як розміри структурних комірок кожного рівня залежать від параметрів армування. Таким чином, волокна з меншим діаметром будуть перебувати в стиснених умовах більш крупних комірок, а фібра більшого діаметра розташована в матриці мікроармованого композиту. В цьому випадку мікрволокна перешкоджають розвитку мікродефектів на стадії утворення тріщин, перебуваючи в контактній

зоні волокон більшого діаметру, і знижують концентрацію напружень, тим самим сприяючи їх перерозподіл на більший об'єм бетону. В даному варіанті відбувається збільшення міцності зчеплення волокон більшого діаметра з матрицею, що в підсумку і дозволяє домогтися підвищення міцності композиту.

Однак, поряд з таким загально-теоретичним підходом до структуроутворення фібробетону, який ґрунтується на класичних законах композиційних матеріалів, потрібно також враховувати важливу структуроутворюючу роль бетонної матриці, а також значення контактної зони на межі розділу фаз "волокно-матриця", стан якої багато в чому визначає найважливіші характеристики дисперсноармованих бетонів.

Концепція Ю.В. Пухаренка [79] полягає в тому, що на кожному структурному рівні фібробетону можна виділити дві фази, які взаємодіють між собою по поверхні розділу через зону контакту на всіх стадіях структуроутворення і подальшої роботи матеріалу:

- дисперсна фаза, що представляє сукупність відрізків фібр заданого розміру;
- дисперсійне середовище - матриця, в якій відбуваються значні зміни в процесі формування структури і властивостей композиту.

Термодинамічно структура дисперсноармованого бетону формується за рахунок прагнення фаз до рівноваги шляхом зниження їх внутрішньої поверхневої енергії.

Таким чином, питання композиційного дисперсного армування фібробетонів набуває особливої актуальності.

1.5. Теоретичні передумови та наукова гіпотеза

Аналіз наведених вище результатів досліджень дозволяє констатувати, що, незважаючи на певні успіхи, досягнуті в розвитку технології фібробетону, повністю вирішеною цю проблему вважати не можна, а експериментальний досвід в даній області залишає не розкритим цілий ряд питань.

1. На ринку України присутнє достатньо велике різноманіття видів фібри як за видами, так і за розмірами, які, на сьогодні, не достатньо вивчені. Окремі дослідження по вивченню їх ефективності для бетонів або не проведені взагалі, або проведені в не повній мірі.

2. Мало вивчене питання композиційного дисперсного армування бетонів, особливо комбінації "сталевна фібра – базальтова фібра".

3. Не достатньо вивчені технологічні аспекти різних способів введення фібри в бетонну суміш, не запропоновані оптимальні способи.

4. Не досліджено технологічні властивості фібробетонних сумішей при їх композиційному дисперсному армуванні, зокрема водопотреба, розшаровуваність, зв'язність тощо. Мало розглянуті питання впливу на ці властивості пластифікуючих добавок, особливо суперпластифікаторів нового покоління.

5. Літературні джерела однозначно вказують на те, що введення фібри приводить до збільшення відношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску, але конкретні значення $f_{c,tf} / f_{cm}$ відрізняються у більшості дослідників, в окремих випадках досить суттєво. Особливо актуальним це є для бетонів з введенням композицій окремих видів фібри.

6. Для бетонів з композиційним дисперсним армуванням слабо вивчене питання кінетики росту міцності фібробетонів, особливо в ранньому віці.

7. Не проведено порівняльних досліджень особливостей поведінки дрібнозернистих і звичайних важких полідисперсноармованих фібробетонів.

8. Основні дослідження по фібробетону виконані переважно для бетонів звичайних класів (до С50...С60), в той час, як властивості високоміцних фібробетонів (понад С60) вивчені недостатньо.

9. Не існує обґрунтованої експериментально методики проектування складу фібробетону із заданими властивостями.

Детальний аналіз досліджень видатних вітчизняних та зарубіжних вчених (Вировий В.М., Гоц В.І., Дворкін Л.Й., Дерев'яно В.М., Коваль С.В., Кривенко П.В., Лаповська С.Д., Пащенко О.О., Пушкарьова К.К., Рунова Р.Ф., Саницький М.А., Сербін В.П., Толмачов С.М., Ушеров-Маршак О.В.; Баженов Ю.М.,

Голанцев В.А., Дорф В.А., Капрієлов С.С., Курбатов Л.Г., Лобанов І.А., Малишев В.Ф., Пухаренко Ю.В., Рабинович Ф.Н., Талантова К.В. Bhikshma V., Mangat P.S., Rangan V.K., Rasheed M.H., Shah S.P. та ін.), що присвячені питанням теорії та технології ефективних бетонів та фібробетонів, дозволяє висунути гіпотезу про можливість попередження розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування із застосуванням в оптимальному співвідношенні сталевий та базальтової фібри для отримання високоміцного дисперсноармованого бетону з покращеними експлуатаційними властивостями.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика матеріалів, що були використані в дослідженнях

Вихідними матеріалами при проведенні досліджень служили портландцемент Здолбунівського ПАТ "Волинь-цемент", дрібний заповнювач у вигляді кварцового піску середньої крупності з родовищ Славутського р-ну Хмельницької обл. Як крупний заповнювач у бетонних сумішах використовувався гранітний щебінь фракцій 2-5 та 5-20 мм Вирівського кар'єру Рівненської області. У якості хімічних добавок-модифікаторів використовували суперпластифікатори нафталін-формальдегідного (НФ) типу СП-1 (С-3) та полікарбосилатного (ПК) типу Melflux 2651 F. В якості дисперсних армуючих волокон були обрані сталева фібра п'яти різних видів, базальтова та поліпропіленова фібра.

Портландцемент. Портландцемент ПАТ "Волинь-цемент" є типовим середньоалюмінатним цементом, найбільш характерним для сучасної вітчизняної цементної промисловості [100]. Для досліджень був обраний цемент типу ПЦ-І за ДСТУ Б В.2.7-46:2010 марки 500. Вибір середньоалюмінатного цементу пояснюється його ефективністю при введенні в бетонні суміші суперпластифікаторів. Як показали роботи НДІЗБ, перехід на високоалюмінатні цементы ($C_3A > 7\%$) потребує збільшення дозування СП майже в два рази для отримання рівнорухомих бетонних і розчинних сумішей [101].

Фізико-механічні властивості цементу, що був використаний в дослідженнях, наведений в табл. 2.1, а хіміко-мінералогічний склад в табл. 2.2.

Заповнювачі. Характеристики дрібного та крупного заповнювачів представлені в табл. 2.3.

Істотних включень у піски органічних, сірчистих і сірчаноокислих домішок, аморфного кремнезему не виявлено. Зерновий склад піску знаходився в діапазоні, що відповідає вимогам ДСТУ Б.В.2.7-126:2011.

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні характеристики цементу ПЦ-I -500

Показники	Згідно ДСТУ Б В.2.7- 46:2010	Середні значення
Залишок на ситі №008, %	<15,0	6,0-10,0
Питома поверхня за Блейном, м ² /кг,	-	250-360
Нормальна густина цементного тіста, %	-	26,5
Строки тужавлення: початок, хв - кінець год -	> 60 < 10	90-150 4,5-5
Міцність у віці 2 доби, МПа: згин - стиск -	- > 15	3,2-4,2 18,0-25,0
Міцність у віці 28 діб, МПа: згин - стиск -	- > 50	6,0-6,8 50,0-55,0
Рівномірність зміни об'єму, мм	< 10	5
Вміст добавки гіпсу в перерахунку на SO ₃ ;, %	3,5	3,1

Хімічні добавки-модифікатори. Для порівняння ефективності дії суперпластифікаторів (СП) різних типів були обрані характерні СП на нафталін-формальдегідній та полікарбоксилатній основі.

Суперпластифікатор С-3 (СП-1) – продукт конденсації нафталін-сульфокислот і формальдегіду, який складається з суміші олігомерів і полімерів, так званої “активної речовини”, та солі, що не прореагувала в ході реакції, β-нафталінсульфокислоти і сульфату натрію [101]. Дана порошкоподібна добавка відповідно до ГОСТ 24211 відноситься до пластифікуючих та водоредукуючих добавок І групи.

Таблиця 2.2 – Хімічний та мінералогічний склад клінкеру
ПАТ "Волинь-Цемент"

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

Таблиця 2.3 – Характеристика заповнювачів

Показники	Пісок	Щебінь Щ1	Щебінь Щ2
Модуль крупності	2,12	-	4,95
Фракція, мм	-	5-20	2-5
Найбільша крупність зерен, мм	2,5	20	5
Повний залишок на ситі 0.63, %	38	-	-
Водопотреба, %	6,7	3,2	4,3
Вміст пилюватих і глинистих часток, %	1,9	-	0,3
Дійсна густина, кг/м ³	2690	2630	2640
Насипна густина, кг/м ³	1380	1450	1385
Пустотність, %	48,7	43,5	47,5

Melflux 2651 F – порошоків полікарбонатний суперпластифікатор останнього покоління для бетонів і будівельних розчинів. Добавки полікарбонатного типу володіють набагато більш низькою адсорбційною здатністю (що обумовлено наявністю в їх складі великої кількості неіонізованих груп COONa - і SO_3Na з відмінностями у властивостях).

На відміну від традиційних суперпластифікаторів, дія полікарбонатних суперпластифікаторів [26], в основному базується на стеричному ефекті, завдяки якому знижується тертя компонентів суспензії цементного тіста. Дані суперпластифікатори мають значно кращу - до 30%, водоредукуючу здатність у порівнянні з СП на основі нафталінформальдегідів та акрилатів.

Фібра. В якості армувальних елементів використовувалась сталевая, базальтова та поліпропіленова фібра.

Основним видом сталевий фібри, що застосовувалась в більшості досліджень була сталевая фібра хвилястого профілю (рис. 2.1). Для порівняння ефективності дисперсного армування сталевий фіброю досліджували також чотири інших види сталевий фібри. Загальний вид, марки та характеристики сталевий фібри наведені на рис. 2.2 та в табл. 2.4.



Рисунок 2.1 – Сталевая фібра хвилястого профілю

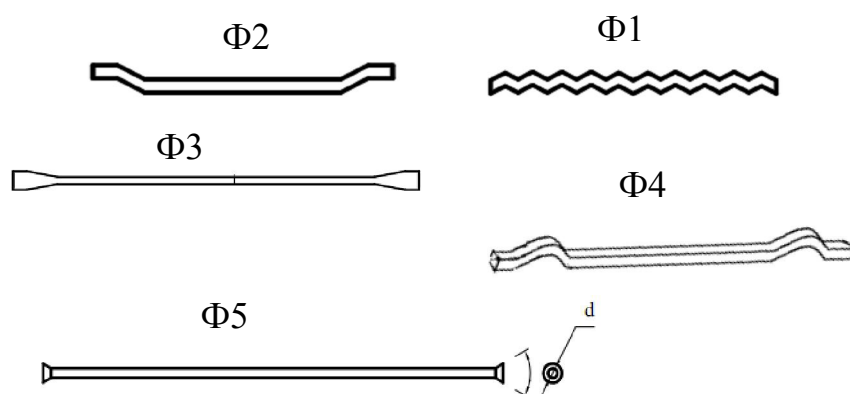


Рисунок 2.2 – Основні види та марки сталеві фібри

Таблиця 2.4 – Види фібри: основні характеристики (згідно EN 14889-1, ТУ У В.2.7-28.7-00191046-015:2007)

Основні показники	Вид фібри				
	Хвиляста Φ1 60/1	Анкерна із загнутими кінцями Φ2 60/1	Анкерна зі сплюсненими кінцями Φ3 50/1	Анкерна із загнутими кінцями Φ4 33/0,85/0,75	Прямолінійна фібра з анкерами у вигляді конусів Φ5 54/1
Довжина (L), мм	60,0 ± 6,0	60,0 ± 6,0	50,0 ± 5,0	33,0 ± 3,0	54,0 ± 4,0
Діаметр (d), мм	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	0,9*	1,0 ± 0,03
$\Lambda=L/d$	60	60	50	37	54
Тимчасовий опір розриву, МПа не менше	1335	1335	1335	1260	1100
Довжина загнутого/сплющеного кінця, мм	-	5,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,0 ± 0,1
Висота хвилі/загнутого кінця, мм	4,5 ± 0,1	5,0 ± 0,1	-	5,0 ± 0,1	-
Середня густина сталі (ρ), г/см ³	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86

* Еквівалентний діаметр

Для отримання фібробетонів із композиційним дисперсним армуванням використано модифіковану базальтову фібру РБР-18-т10 ТзОВ "Технобазальт-

Інвест" (м. Київ) довжиною 12 та 24 мм, виготовлену з базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009 (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд базальтової фібри

До відомих технічних переваг базальтової фібри належить забезпечення тривимірного армування бетонних сумішей та розчинів, збільшення стійкості до стирання, підвищення водонепроникності та морозостійкості.

Також для вивчення порівняльного впливу виду волокон, що застосовуються в композиції із сталлюю фіброю, застосовували поліпропіленові волокна довжиною 12 та 18 мм.

Основні характеристики базальтових та пропіленових волокон наведені в табл. 2.5-2.6.

Таблиця 2.5 – Основні характеристики базальтової фібри

Найменування показника	Значення
Довжина (L), мм	12, 24
Діаметр (d), мм	16 ± 2
Міцність на розрив Н/мм ²	110
Модуль пружності, МПа	70000
Термічна стійкість, °С	1450

Таблиця 2.6 – Основні характеристики поліпропіленової фібри

Характеристики	Значення
Діаметр окремого волокна, мкм	20-33
Довжина, мм	12, 18
Міцність на розрив, Н/мм ²	400
Модуль пружності, МПа	4000
Кількість одиничних волокон, млн. шт/кг	350-500
Температура плавлення, °С	170

2.2. Основні методи досліджень

Експериментальні дослідження, результати яких приведені в дисертаційній роботі, виконано з широким застосуванням математичного планування експериментів (МПЕ), що дозволило алгоритмізувати виконання дослідів за схемою, яка є оптимальною з точки зору як об'єму експериментальних робіт, так і статистичних вимог. Великий внесок в розвиток МПЕ в технології бетону здійснили Ю.М. Баженов, В.А. Вознесенський, Л.Й. Дворкін, І.Б. Шамбан [102-106].

Під математичним плануванням експерименту розуміють постановку дослідів за заздалегідь складеною схемою з оптимальними властивостями. Статистичне планування дозволяє при мінімально можливій кількості дослідів вирішувати задачу побудови експериментально-статистичних математичних моделей у вигляді рівнянь регресії, які пов'язують вихідні параметри з вхідними параметрами, різноманітними керованими кількісними факторами, а потім використати ці моделі для аналізу процесів, технологічних розрахунків та оптимізації.

Математичне планування передбачає вибір найбільш суттєвих факторів і межі їх варіювання для визначення вихідних параметрів, а також проведення дослідів за певним статистично оптимальним планом (матрицею планування), від якого визначається передбачуваною залежністю.

Експеримент планується у відповідності з типовою матрицею, тобто таблицею з n рядків та m колонок, в якій приводиться набір комбінацій факторів, варійованих відносно деякого початку координат або нульового (основного) рівня. Допустима область варіювання факторів (факторний простір) вибирається на основі попереднього вивчення об'єкту у відповідності з поставленою метою.

При вивченні нелінійних залежностей в широкому діапазоні зміни факторів використовують плани другого порядку. Для планів другого порядку кожний фактор необхідно планувати не менше, ніж на трьох рівнях: верхньому (+1), середньому (0) та нижньому (-1).

Результати дослідів оброблюють за допомогою методів математичної статистики, отримуючи квадратичні рівняння регресії.

Побудову математичної моделі у вигляді рівняння регресії можна вважати завершеною, а саму модель використовувати для аналізу і прийняття матеріалознавчих і технологічних рішень тільки після того, як алгебраїчний розрахунок оцінок коефіцієнтів буде доповнений статистичним аналізом окремих коефіцієнтів і моделі в цілому.

Фактори відображаються в кодованих і натуральних значеннях. Для реалізації експериментів використані трирівневі, двох-, трьох- і чотирьох-факторні плани B_2 , B_3 і B_4 близькі до D – оптимальних [105]. Відмінною ознакою цих планів є висока точність прогнозування вихідного параметра в області варіювання факторів. Рівняння регресії, маючи квадратичний характер, дозволяють простежити індивідуальний і спільний вплив факторів на досліджувані вихідні параметри, установити необхідні й оптимальні значення факторів.

Всі розрахунки з одержання рівнянь регресії, статистичного і технологічного аналізу виконані за допомогою програмного забезпечення, розробленого на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП.

Приготування фібробетонних сумішей здійснювалося в лабораторному бетонозмішувачі примусової дії БЛ-10.

Для ущільнення сумішей в процесі формування дослідних зразків-кубів розміром $100 \times 100 \times 100$ та $150 \times 150 \times 150$ мм а також балочок розміром $40 \times 40 \times 160$, $150 \times 150 \times 600$ мм, застосовувався стандартний вібромайданчик; тривалість вібрування, в залежності від виду та кількості введеної фібри, становила 30...90 секунд.

Твердіння складів, здійснювалося при постійній температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Дослідні зразки піддавалися комплексу фізико-механічних випробувань.

Механічні випробування зразків проводилися на гідравлічному пресі типу МС-2000 і машині МИИ-100 відповідно до методик, рекомендованих ДСТУ Б В.2.7-214:2009 і ДСТУ Б В.2.7-224:2009.

Випробування фібробетонів *на розтяг при згині* проводили на зразках-призмах розміром $15 \times 15 \times 60$ см за схемою, наведеною на рис. 2.4.

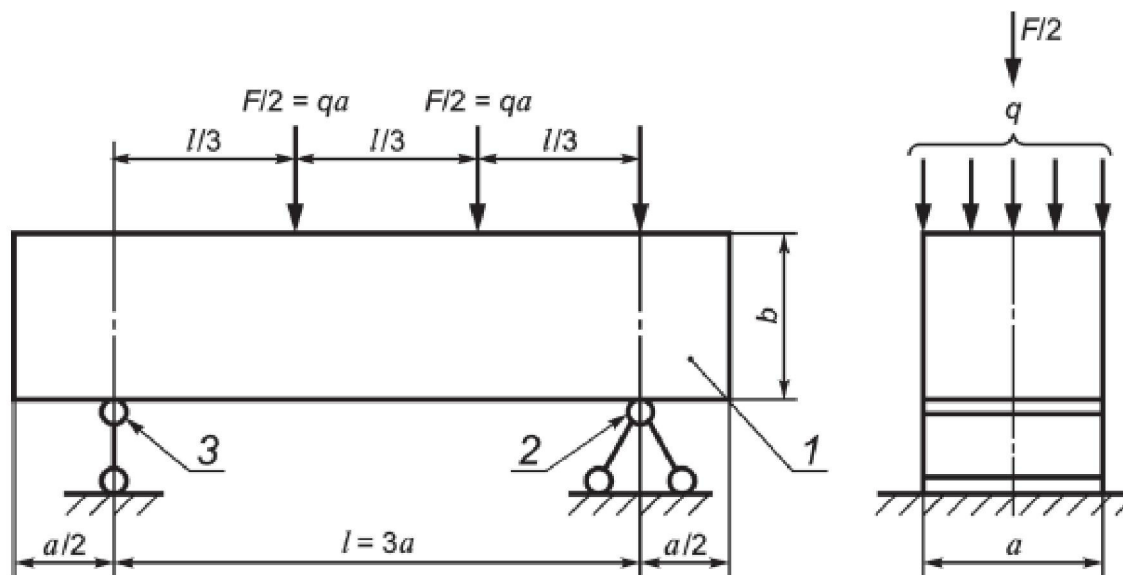


Рисунок 2.4 – Схема випробувань на розтяг при згині:

F – навантаження; q – розподілене навантаження; 1 - зразок-призма; 2 - нерухома опора; 3 - рухома опора

Густина, вологість, водопоглинання і пористість визначалися відповідно до методик, рекомендованих ДСТУ Б В.2.7-170:2008.

Пористість зразків фібробетонів оцінювалася за кінетикою водопоглинання дискретним методом. Як параметри, що характеризують пористість, приймалися:

середній розмір пор λ та показник ступеня однорідності пор α . Умовно замкнута пористість визначалася за різницею мас зразків, насичених до постійної маси при атмосферному тиску, і в умовах форвакууму в вакуумшафі типу HZV фірми «Норгозонт» (Польща), при розрідженні до 750 мм рт.ст.

Деформації усадки вимірювали за допомогою індикатора годинникового типу (ціна поділки 0,001 мм) у терміни визначені ДСТУ Б 8.2.7-216:2009.

Для визначення усадки в торцеві поверхні зразків були заформовані або приклеєні репери з нержавіючої сталі. Зразки зберігалися у вологісних умовах протягом 28 діб. Після 28-добового твердіння в нормально-вологісних умовах зразки поміщалися на повітря зі змінною відносною вологістю 70...85%. Після 3-місячного витримування в цих умовах з фіксуванням деформацій усадки і до відносної її стабілізації, зразки поміщалися в ексікатори з прожареним хлоридом кальцію при відносній вологості повітря 5...10% і кімнатній температурі $20\pm 2^\circ\text{C}$. Після досягнення стабілізації усадки в цих умовах визначалася повна усадка після висушування при температурі 105°C .

Для визначення максимально можливої повної усадки зразки висушували до постійної маси при температурі 105°C . Такий жорсткий режим випробувань вже за 1...3 цикли дозволяв зробити прогноз щодо усадки фібробетону в умовах природного знакозмінного повітряно-вологісного режиму.

Дослідження *морозостійкості* дисперсноармованих бетонів проводили за прискореною методикою в термокамері H5280.75 при температурі -50°C згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96. Розморозування зразків здійснювали у ванні з 5%-ним водним розчином натрію хлориду при температурі $20\pm 2^\circ\text{C}$. Визначення марки за морозостійкістю фібробетонів проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96.

Ударна міцність. Досліджуваний зразок фібробетону випробовувався на копрі (рис. 2.5), який складається із основної утримуючої рами та бойка. Ударна міцність оцінювалася за величиною роботи, що витрачається на руйнування зразка, віднесеної до його об'єму. Робота руйнування визначалась з виразу:

$$A = \frac{P \cdot (1 + 2 + 3 + \dots + n)}{V}, \quad (2.1)$$

де P – маса бойка, кг; $1,2,3\dots n$ – порядковий номер удару, що призвів до руйнування зразка; V – об'єм зразка, см^3 .



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд установки для визначення ударної міцності

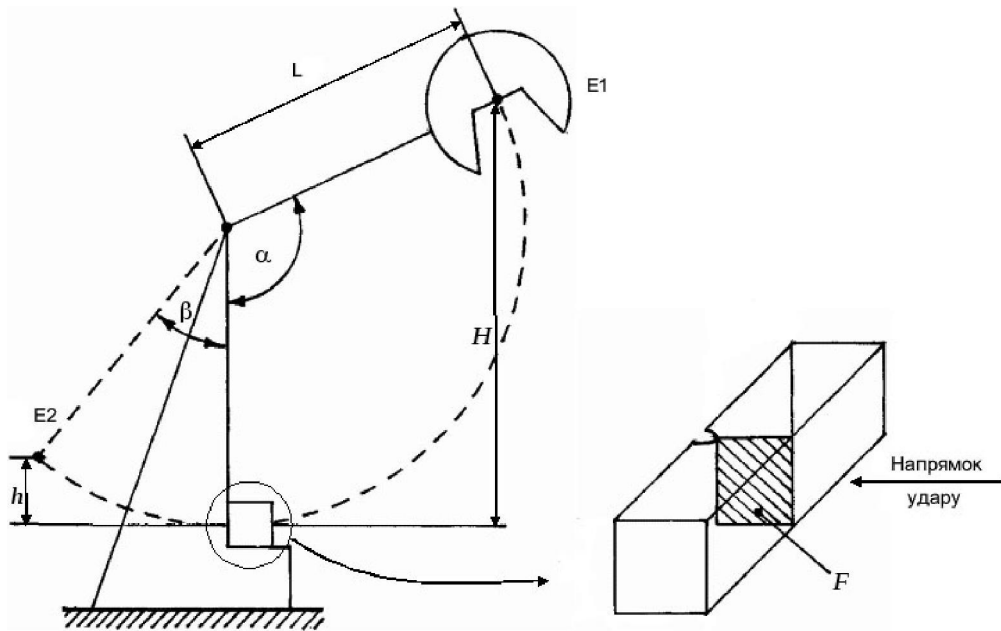
Ударна в'язкість. Оцінює роботу руйнування надрізаного зразка при ударному згині на маятниковому копрі (рис. 2.6). У Міжнародній системі одиниць (СІ) ударна в'язкість виражається в $\text{Дж}/\text{м}^2$ (відношення роботи до площі поперечного перерізу в місці надрізу). Випробуваний зразок (балочка квадратного перетину з надрізом посередині) укладали на опори копра так, щоб надріз був розташований симетрично опор і протилежний удару, що наноситься. За кутом відхилення маятника після удару або за шкалою визначали роботу, витрачену на руйнування зразка:

$$A_n = \frac{P \cdot L}{\cos \beta - \cos \alpha}; \quad (2.2)$$

де P – вага маятника, Н; L - довжина маятника - відстань від осі до центра ваги, м; α і β - кути підйому маятника відповідно до і після зламу зразка, град.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд маятничого копра МК-30А (а) та схема випробування на ударну в'язкість (б)

Ударну в'язкість визначали за виразом, Дж/м²:

$$a_n = \frac{A_n}{F}, \quad (2.3)$$

де A_n - робота удару, витрачена на злам зразка, Дж; S – площа поперечного перерізу зразка в місці надрізу до випробування, м².

РОЗДІЛ 3

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВИДУ ТА ВМІСТУ СТАЛЕВОЇ ФІБРИ А ТАКОЖ СПОСОБІВ ЇХ ВВЕДЕННЯ НА МІЦНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕФІБРОБЕТОНІВ

3.1. Вплив геометричних характеристик фібри

На ринку є досить велика кількість видів сталевих фібр, що відрізняються геометричними характеристиками й способами анкерування волокон у матриці. Дані досліджень щодо впливу виду, профілю, способу анкерування на міцнісні показники сталевих фібробетонів є досить суперечливі. В роботах [78, 107] відзначається перевага сталевих фібр із анкерами на кінцях (гнуті кінці), в інших – хвилястого профілю [108]. Загальним у всіх випадках є відзначення важливості забезпечення високої міцності зчеплення дисперсної арматури з бетоном за рахунок як механічного так і адгезійного зчеплення.

Даний етап досліджень передбачав встановлення впливу параметрів складу при застосуванні різних поширених видів фібри на можливість отримання високоміцного сталевих фібробетону з відносно невеликими витратами цементу та фібри.

В дослідженнях використовували наступні види фібри (рис. 2.2):

- 1) хвиляста типу Fibax Ф1 60/1;
- 2) анкерна із загнутими кінцями «Dramix» компанії «Becaert» Ф2 60/1;
- 3) анкерна із сплющеними кінцями "Mixarm" Ф3 50/1;
- 4) анкерна із загнутими кінцями "Челябінка" Ф4 33/0,85/0,75;
- 5) прямолінійна фібра з анкерами у вигляді конусів "Mixarm" Ф5 54/1.

Основні характеристики цих видів фібри наведені в табл. 2.4.

На першому етапі дослідження проводили з використанням трьох видів фібри: Ф1, Ф2 та Ф3.

Для встановлення виду фібри, що дозволяє отримати бетон з найбільш високими показниками міцності на розтяг при згині були проведені

експерименти із застосуванням математичного планування [105]. Були реалізовані дві напіврепліки типу 2^{3-1} . Умови планування експериментів наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Умови планування експериментів при виборі виду фібри

Фактори впливу		Рівні варіювання факторів	
Натуральний вид	Кодований вид	-1	+1
Вид фібри	X_1	Анкерна (Ф2/Ф5)*	хвиляста (Ф1)
Водоцементне відношення	X_2	0,35	0,45
Вміст цементу, кг/м ³	X_3	500	600

*- в першій напіврепліці була застосована анкерна фібра із загнутими кінцями Ф2, а в другій – зі сплющеними кінцями Ф3.

Дослідження проводили на двох видах бетону: на звичайному важкому із застосуванням в якості крупного заповнювача щебеню 5...20 мм та дрібнозернистому із застосуванням в якості заповнювача фракційної суміші – 0,16...2 мм (кварцовий пісок) та 2...5 мм (гранітний щебінь).

В якості вихідних компонентів бетонної суміші використовували цемент ПЦ-I М500, кварцовий пісок із $M_{кр}=2,1$, гранітний щебінь фракції 5..20 мм. Витрата фібри складала 40 кг/м³ ($\mu = 0,5\%$). В бетонні суміші вводили добавку суперпластифікатора полікарбосилатного типу Melflux 2651f.

Співвідношення піску і щебеню для звичайного важкого бетону розраховували згідно відомих рекомендацій [23]. Бетонні суміші виготовляли з однаковою рухомістю ($OK = 15$ см).

Попередньо були проведені досліди на двох видах бетону без використання фібри (матриця). Значення міцності при стиску та на розтяг при згині для звичайного важкого і дрібнозернистого бетонів наведені в табл. 3.2.

Як видно з наведених даних, збільшення В/Ц з 0,35 до 0,45 зменшує міцність при стиску на 20...25% і меншою мірою міцність на розтяг при згині. Збільшення витрати цементу при одному й тому ж В/Ц слабо позначається на значеннях міцності.

Таблиця 3.2 – Значення міцності бетонів залежно від витрати цементу та В/Ц

В/Ц	Витрата цементу	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	Міцність на стиск у віці 7діб, МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	Міцність на стиск у віці 28діб, МПа
Важкий бетон					
0,35	500	3,1	75,8	3,7	80,3
0,35	600	3,0	69,5	3,8	82,1
0,45	500	2,5	63,8	3,2	68,1
0,45	600	2,9	65,3	3,1	73,3
Дрібнозернистий бетон					
0,35	500	3,1	61,1	4,0	73,9
0,35	600	4,2	64,3	4,3	76,3
0,45	500	3,5	43,6	3,6	58,8
0,45	600	3,0	48,1	3,8	63,9

В результаті реалізації двох напівреплік (табл. 3.1) та статистичної обробки експериментальних даних отримані поліноміальні моделі виду:

$$y=b_0+ b_1X_1+ b_2X_2+ b_3X_3+ b_{12}X_1X_2. \quad (3.1)$$

Коефіцієнти математичних моделей міцності при стиску та при згині для **звичайного важкого бетону** приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти математичних моделей міцності з порівнянням видів фібри для звичайного важкого бетону

Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	3,26/2,98	-1,37/-1,21	-0,2/-0,1	0,05/0,03	2,4/0,56
Міцність на стиск у віці 1 доба, МПа	38,2/39,1	-1,5/-2,3	-3,6/-2,1	0,9/2,5	0,3/1,1
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	4,55/4,48	-1,25/-1,33	-0,1/-0,2	0,1/0,03	0,1/0,03
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	6,0/5,78	-1,4/-1,63	-0,3/-0,3	0,2/0,18	0,2/0,18
Міцність на стиск у віці 7діб, МПа	62,3/64,3	-2,25/-0,25	-6,8/-3,8	-2,3/0,75	-2,3/0,75
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	77,3/74,8	-3,5/-6	-5,3/-4,3	0,5/1,5	0,5/1,5

*- над ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилястої Ф1 та анкерної фібри із загнутими кінцями Ф2; під ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилястої Ф1 та анкерної фібри зі сплющеними кінцями Ф3.

На рис. 3.1.-3.3 наведені графічні залежності, що отримані відповідними розрахунками по моделях, які характеризують залежність міцності бетону на розтяг при згині ($f_{c,tf}$) і стиску (f_{cm}) у віці 1, 7 та 28 діб від В/Ц при використанні різних видів сталеві фібри.

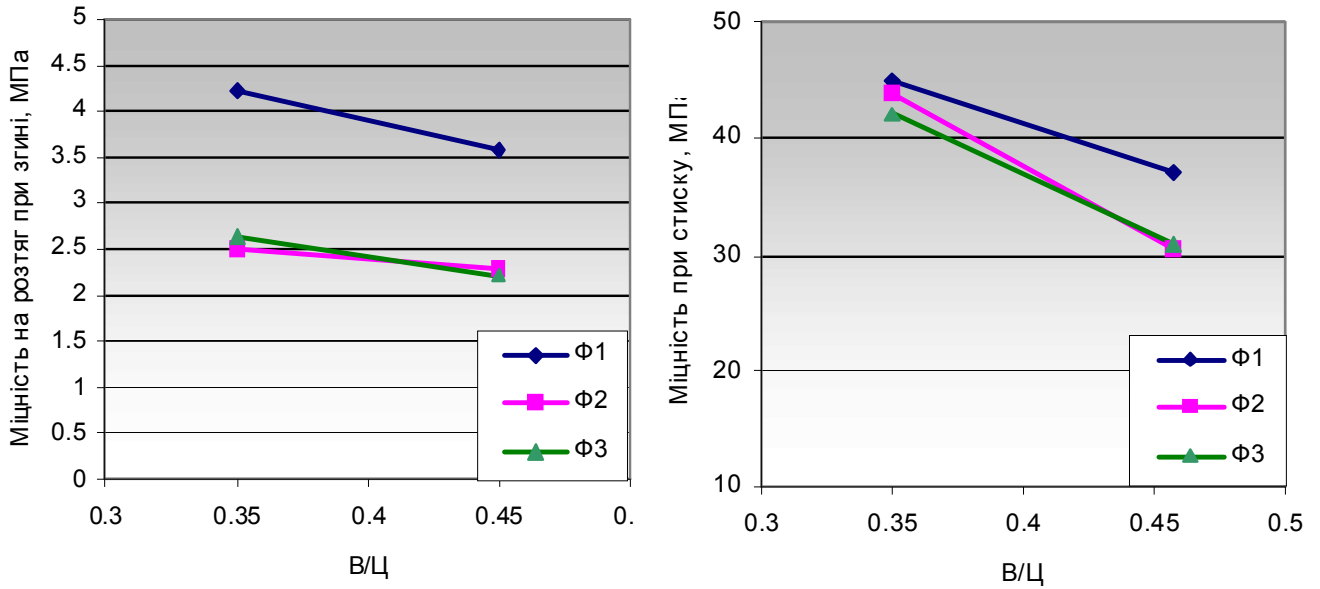


Рисунок 3.1 – Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску сталевіфібробетону у віці 1 доба від В/Ц

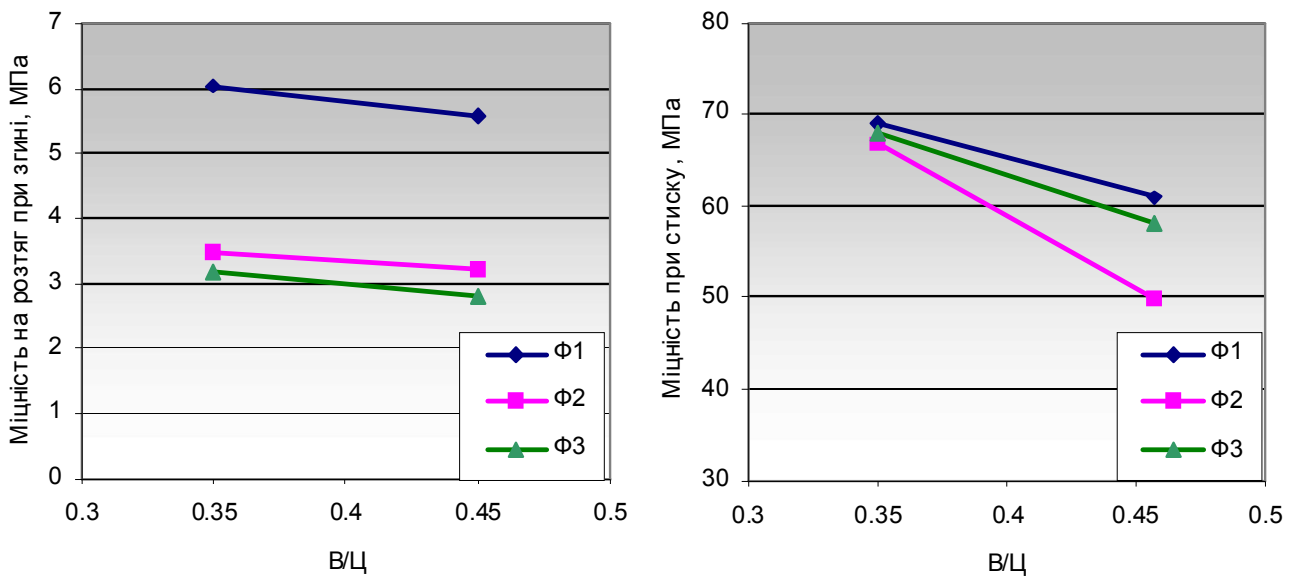


Рисунок 3.2 – Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску сталевіфібробетону у віці 7 діб від В/Ц

Аналіз математичних моделей та графічних залежностей дозволяє зробити висновок, що найвищі значення міцності як при стиску і, особливо, при згині досягаються при використанні фібри хвилястого профілю Ф1. Це, очевидно, можна пояснити збільшеною поверхнею зчеплення такої фібри з розчином у порівнянні із анкерною фіброю.

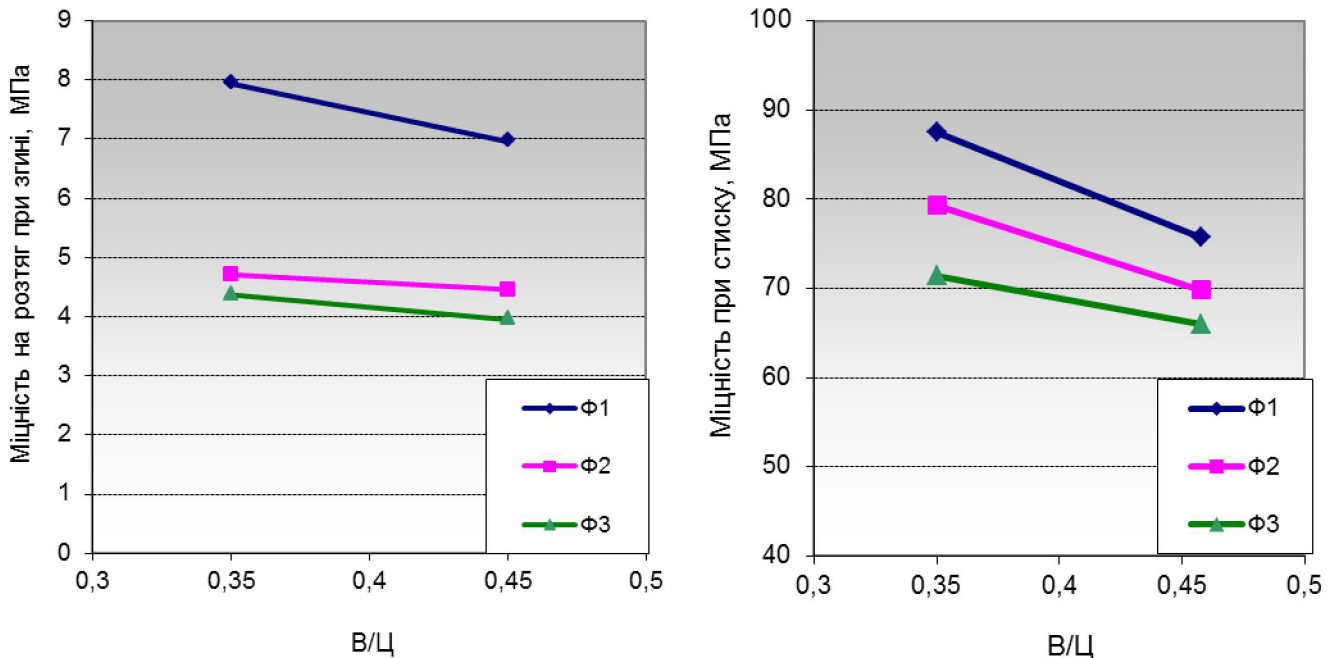


Рисунок 3.3 – Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску сталевібробетону у віці 28 діб від В/Ц

Збільшення водоцементного відношення приводить до зменшення міцності у всі строки, причому більшою мірою міцності при стиску (на 20...30%).

Збільшення витрати цементу при постійному В/Ц приводить до зростання міцності, однак вплив даного фактору в межах області варіювання факторів можна вважати несуттєвим.

Коефіцієнти математичних моделей міцності при стиску та при згині для **дрібнозернистого бетону** приведені в табл. 3.4.

На рис. 3.4 - 3.6 наведені графічні залежності, що отримані відповідними розрахунками по моделях, які характеризують залежність міцності дрібнозернистого бетону на розтяг при згині ($f_{c,tf}$) і стиску (f_{cm}) у віці 1, 7 та 28 діб від В/Ц при використанні різних видів сталевібро.

Таблиця 3.4 – Коефіцієнти математичних моделей міцності з порівнянням видів фібри для дрібнозернистого бетону

Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	5,3/4,84	-1,65/-2,05	-1,2/-1,3	0,6/0,22	1,6/0,18
Міцність на стиск у віці 1 доба, МПа	40,3/41,7	-1,3/-1,8	-4,3/-3,3	0,4/0,8	0,5/1,2
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	7,32/6,8	-2,3/-1,7	-1,1/-1,3	0,15/0,2	0,15/0,9
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	10,2/11,3	-2,1/-0,8	-0,9/-1,2	0,3/0,4	0,26/-0,3
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	64,1/64,9	-1,35/-0,25	-5,7/-4,1	1,2/0,95	1,1/0,9
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	80,1/77,8	-2,2/-5,1	-4,2/-3,2	0,9/1,2	3,5/0,8

*- над рисою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилястої Ф1 та анкерної фібри із загнутими кінцями Ф2; під рисою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилястої Ф1 та анкерної фібри зі сплющеними кінцями Ф3.

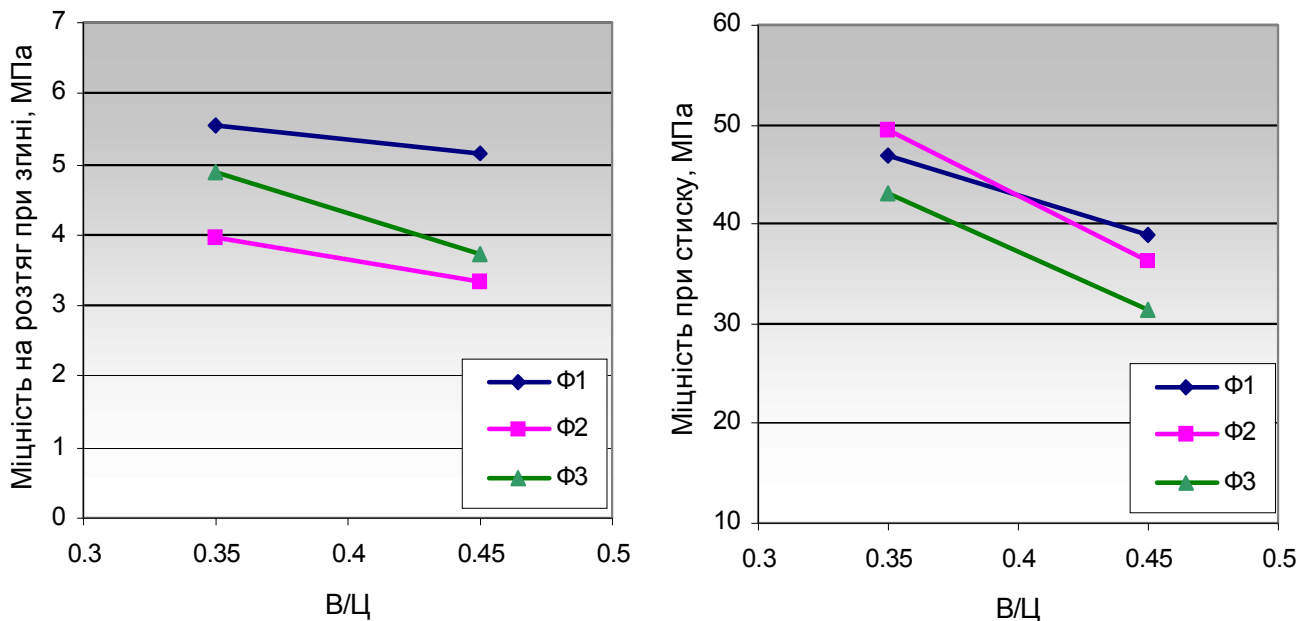


Рисунок 3.4 – Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону у віці 1 доба від В/Ц

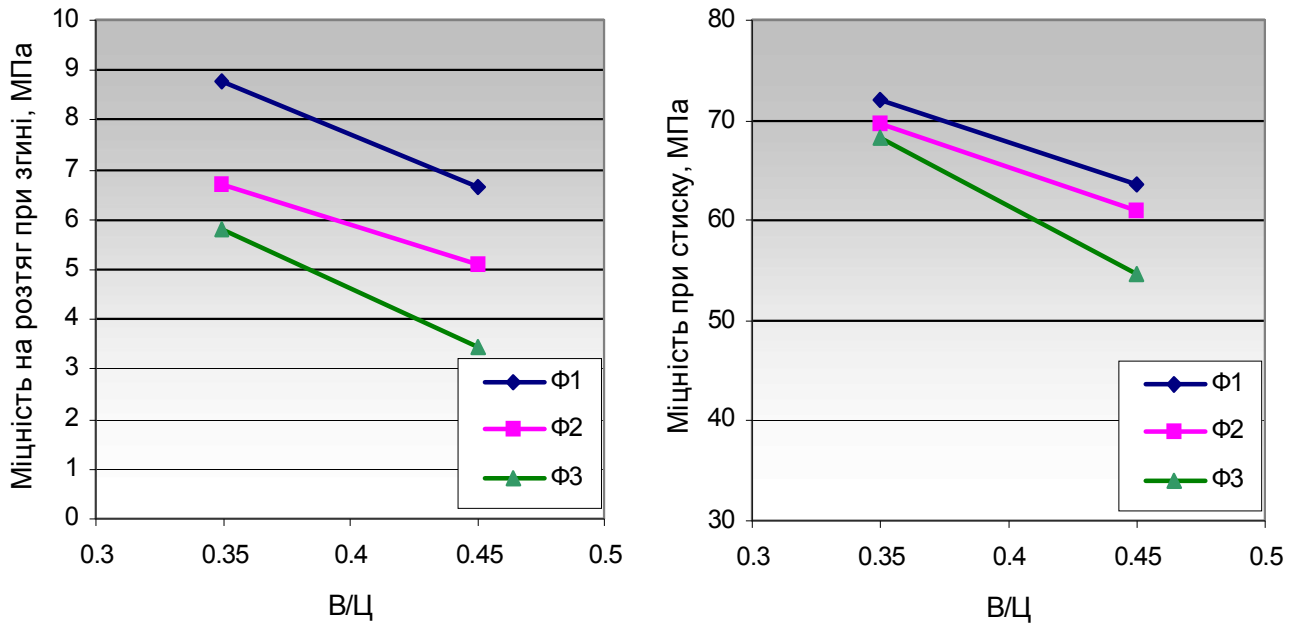


Рисунок 3.5 – Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону у віці 7 днів від В/Ц

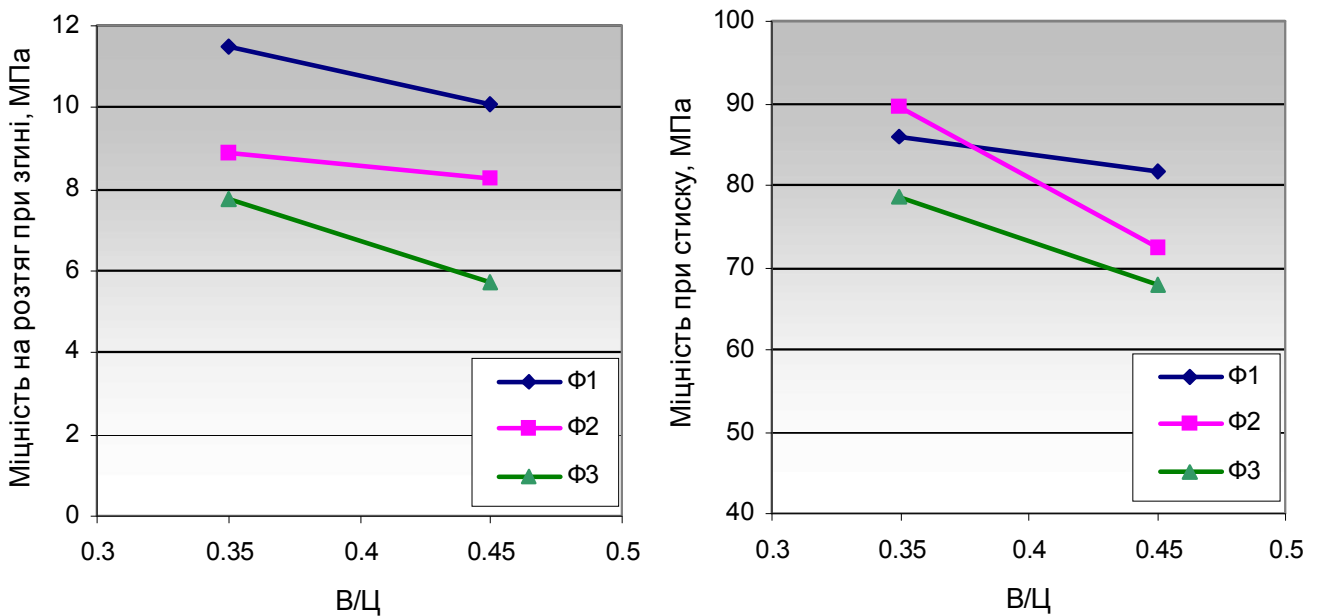


Рисунок 3.6 – Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону у віці 28 днів від В/Ц

Аналіз математичних моделей (табл. 3.4) та графічних залежностей (рис. 3.4-3.6) дозволяє зробити висновок, що міцність дрібнозернистого фібробетону у всі строки залежить від факторів впливу схожим чином, як і для звичайного важкого бетону. В той же час абсолютні значення міцності на розтяг

при згині є суттєво вищими у порівнянні із звичайним важким бетоном (на 40...50%), що можна пояснити збільшенням площі поверхні контакту фібри із розчиною матрицею дрібнозернистого бетону. Міцність при стиску зростає несуттєво в межах 5...10% залежно від виду фібри та віку зразків.

Найвищі значення міцності знову таки ж досягаються при використанні фібри хвилястого профілю Ф1. Однак найбільш яскраво ця залежність проявляється при визначенні міцності на розтяг при згині, в той час, як для міцності при стиску при низьких значення В/Ц спостерігається навіть незначне переважання фібри типу Ф2 (рис. 3.6).

Збільшення водоцементного відношення приводить до зменшення міцності у всі строки, причому більшою мірою міцності при стиску.

Розглядаючи кінетику зростання міцності сталевібробетонів у часі (рис. 3.7, 3.8), можна відзначити, що її значення у віці 1 доба складає близько 50% від 28-добового значення, а у віці 7 діб – близько 80%.

Перший етап дослідження показав більш ефективним використання хвилястої фібри типу Ф1. Для порівняння ефективності дисперсного армування на ще двох видах фібри, а саме анкерної із загнутими кінцями (Ф4) та прямолінійної з анкерами у вигляді конусів (Ф5) на другому етапі було

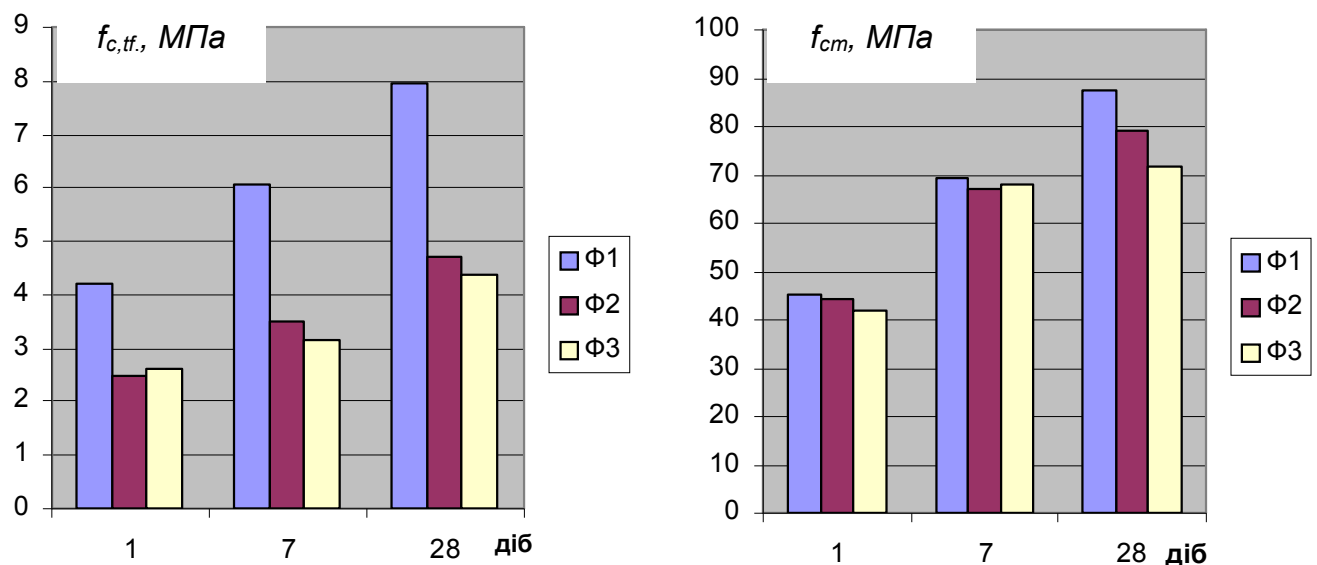


Рисунок 3.7 – Кінетика зростання міцності на розтяг при згині та стиску сталевібробетону з різними видами фібри

проведено ряд окремих дослідів. Сталефібробетонні зразки виготовлялися на дрібнозернистих сумішах з В/Ц = 0,35 та при витраті цементу 500 кг/м³.

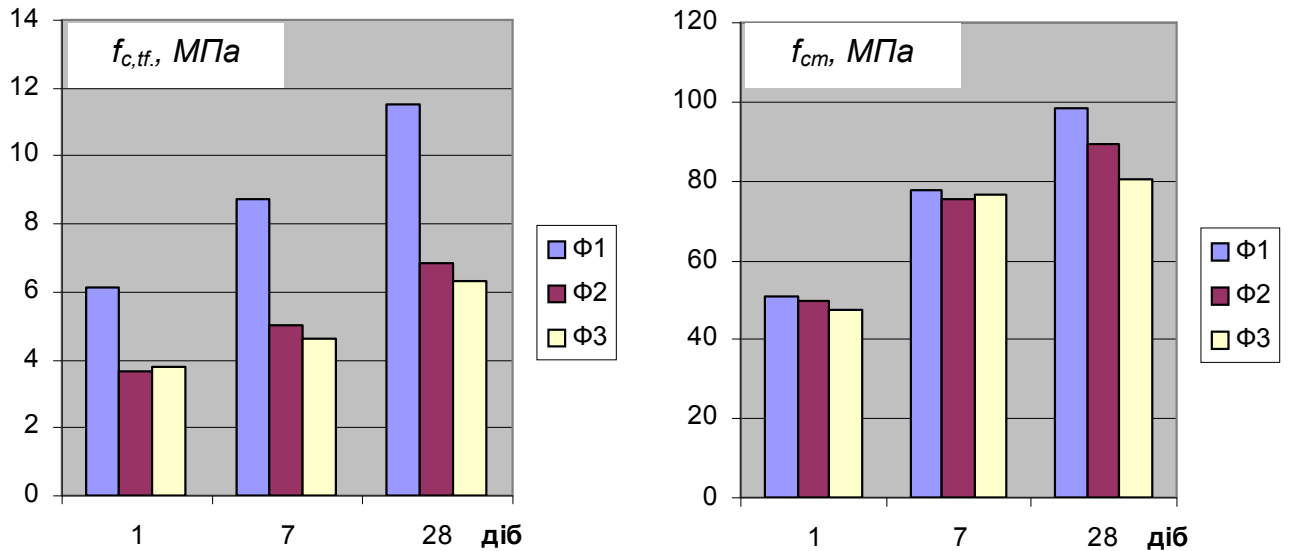


Рисунок 3.8 – Кінетика зростання міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталефібробетону з різними видами фібри

Порівняльні діаграми міцності для зразків з використанням всіх видів фібри та без неї наведено на рис. 3.9, 3.10.

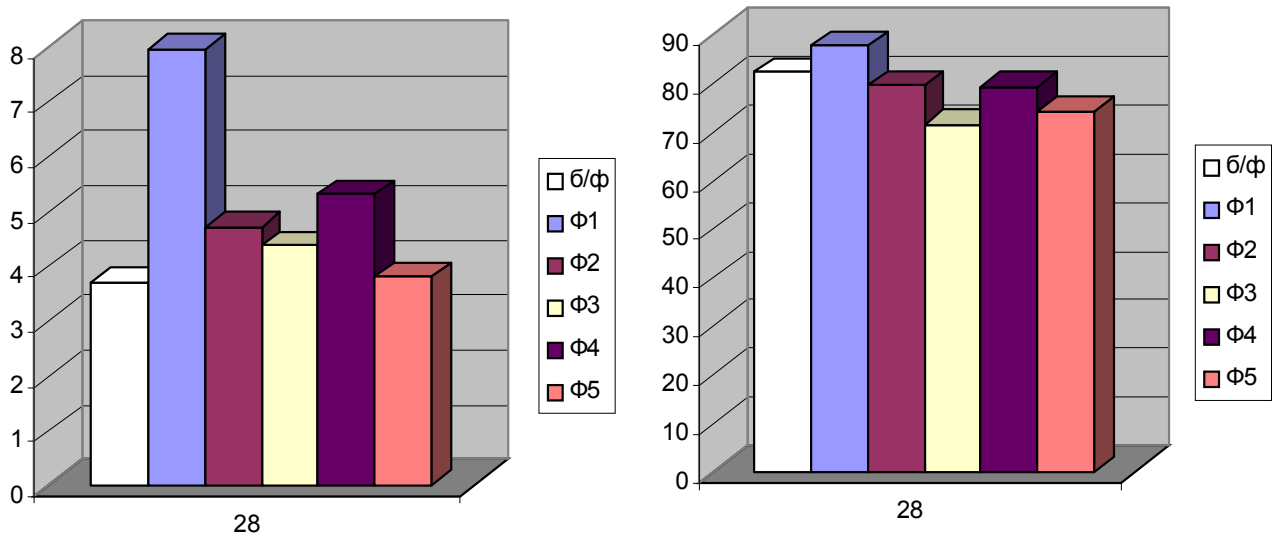


Рисунок 3.9 – Вплив виду фібри на значення міцності на розтяг при згині та стиску сталефібробетону у віці 28 діб ($\mu = 0,5\%$)

* б/ф – без фібри

Як видно з одержаних результатів, анкерна фібра із загнутими кінцями "Челябінка" (Ф4) показала суттєвий приріст міцності на розтяг при згині у

порівнянні із базовим складом, особливо для дрібнозернистого бетону, але в той же час значно поступається хвилястій фібрі Ф1. Фібра Ф5 показала результати на рівні досліджених раніше видів фібри Ф3 та Ф4.

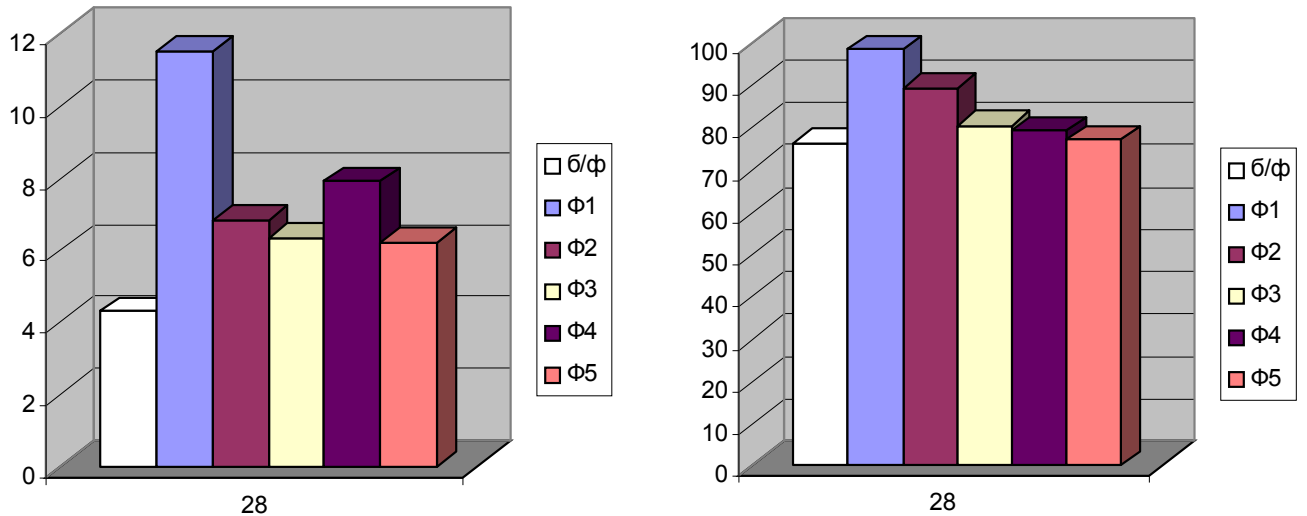


Рисунок 3.10 – Вплив виду фібри на значення міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону у віці 28 діб ($\mu = 0,5\%$)

* б/ф – без фібри

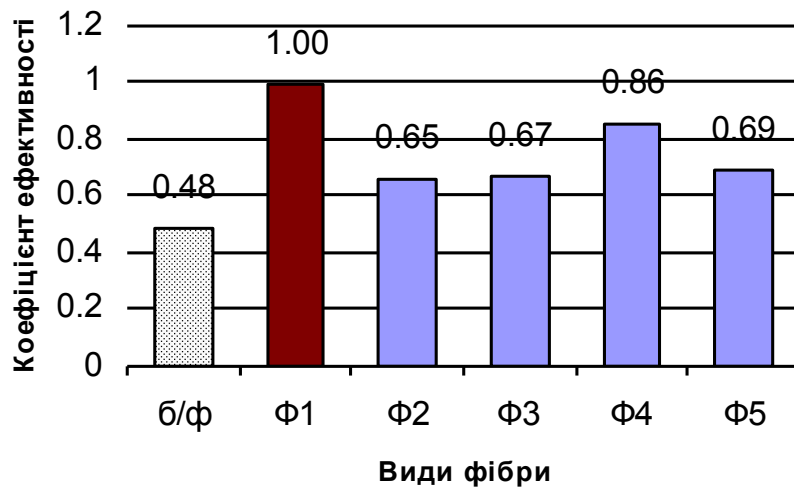


Рисунок 3.11 – Значення коефіцієнта ефективності дисперсного армування при використанні різних видів фібр для дрібнозернистого бетону

Очевидно, основний ефект від дисперсного армування бетонів проявляється у збільшенні співвідношення $f_{c,tf} / f_{cm}$ (коефіцієнта ефективності). Це можна явно прослідкувати з рис. 3.11, на якому відображені відносні коефіцієнти ефективності дисперсного армування різними видами фібри для дрібнозернистого бетону.

За одиницю прийняте співвідношення $f_{c,tf} / f_{cm}$ для дрібнозернистого фібробетону з використанням фібри Ф1. Для всіх видів фібри коефіцієнт ефективності є більший ніж для бетону, не армованого фіброю.

Таким чином, для подальших досліджень обрана сталева хвиляста фібра, яка є найбільш ефективною в плані збільшення міцності на розтяг при згині.

3.2. Вибір оптимального вмісту сталеві фібри

З підвищенням об'ємної концентрації дисперсного армування фізико-механічні характеристики фібробетону зростають до певного рівня, після досягнення якого характеристики починають знижуватись [83]. Тому існує певне співвідношення об'ємів волокна й матриці, при яких фізико-механічні характеристики фібробетону будуть мати максимальне значення.

Встановлено [109], що в інтервалі мінімального й максимального відсотка армування ($\mu_{\min} - \mu_{\max}$) має місце характерна точка, що відповідає моменту утворення фіброцементного каркаса (μ_k), до і після якої поведінка композита та його властивості суттєво відрізняються (рис. 3.12).

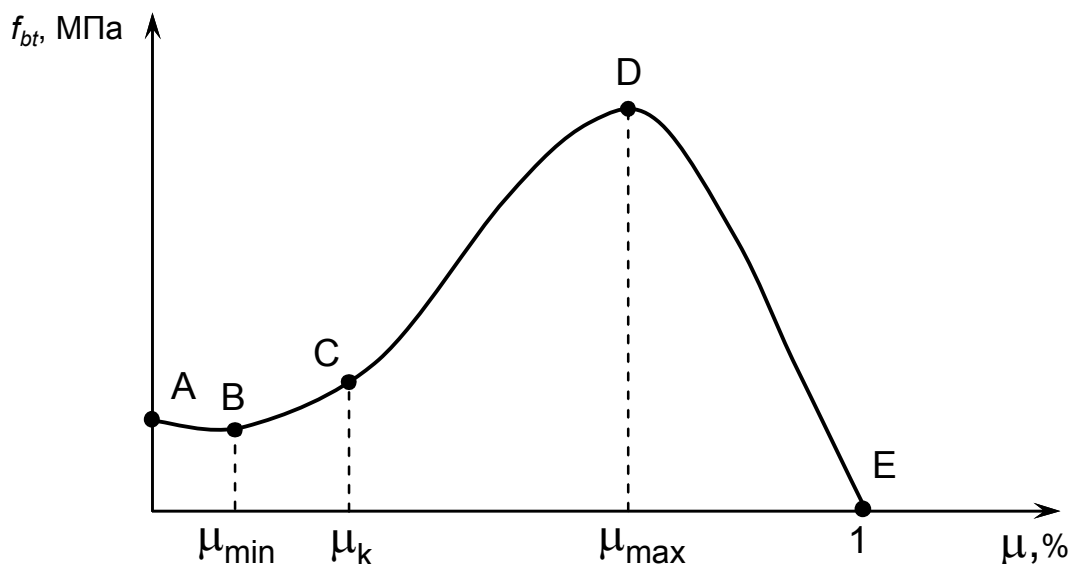


Рисунок 3.12 – Характер зміни міцності фібробетону залежно від об'ємної концентрації волокон

Ділянка AB характеризує область, коли волокна віддалені один від одного на значні відстані ("зона розсіяного армування"), міцність фібробетону характеризується міцністю матриці й практично не відрізняється від неї. Ділянка

BC характеризує "зону зосередженого армування", при розтріскуванні матриці волокна здатні сприймати навантаження й забезпечувати несучу здатність фібробетону. Точка C є моментом злиття контактних зон "фібра – матриця" і утворення фіброцементного каркаса. На ділянці CD має місце подальше, причому більш інтенсивне, підвищення міцності фібробетону, що є результатом ущільнення цементного каменю між волокнами. Точка D відповідає максимальній міцності фібробетону, подальше зниження якої обумовлено зменшенням товщини матричного шару настільки, що матеріал проявляє схильність до розшарування навіть при невеликих навантаженнях.

Оптимальне значення вмісту сталевих фібри визначали з урахуванням забезпечення максимального значення міцності на розтяг при згині. Для цього використовували метод «крутого сходження» [105]. Зазначений метод визначає стратегію послідовного покрокового проведення експериментів, при якому весь цикл досліджень розбивається на окремі етапи з виходом в область оптимального значення фактора.

На першому етапі був реалізований трьохрівневий трьохфакторний, близький до D – оптимального, план [105]. Умови планування експерименту наведені в табл. 3.5. Дослідження проводили на звичайному важкому бетоні із застосуванням в якості крупного заповнювача щебеню 5...20 мм із використанням хвилястої фібри Ф1.

Таблиця 3.5 – Умови планування експерименту при визначенні параметрів складів сталевих фібробетону

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X_1	Витрата цементу, кг/м ³ (Ц)	450	500	550	50
2	X_2	В/Ц	0,35	0,4	0,45	0,1
3	X_3	Витрата фібри, кг/м ³ (Ф)	0	20	40	20

Результати експериментів наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Експериментальні результати по визначенню оптимального вмісту фібри

№ т.пл ану	Кодовані значення факторів			Витрати компонентів, кг/м ³					В/Ц	Melflux, %	ОК, см	f_{cm}^3 , МПа	$f_{c,tf}^3$, МПа	f_{cm}^7 , МПа	$f_{c,tf}^7$, МПа	f_{cm}^{28} , МПа	$f_{c,tf}^{28}$, МПа
	X_1	X_2	X_3	Ц	П	Щ	В	Ф									
1	+	+	+	550	419	1206	247	40	0,45	0,25	18	26,5	2,6	37,5	3,5	58	5,6
2	+	+	-	550	419	1206	247	0	0,45	0,14	19	25,5	1,1	35	1,8	54	2,2
3	+	-	+	550	580	1206	193	40	0,35	0,92	19	55,3	4,3	60	5,6	86	6,9
4	+	-	-	550	580	1206	193	0	0,35	0,68	18	61,1	2,5	69	3,1	82	3,1
5	-	+	+	450	646	1206	203	40	0,45	0,41	18,5	41,2	3,4	54,5	4,6	62	5,8
6	-	+	-	450	646	1206	203	0	0,45	0,26	16	44,8	2,2	55,6	2,7	69	2,6
7	-	-	+	450	779	1206	157	40	0,35	1,13	19,5	42,5	1,8	66,8	5	80	6,6
8	-	-	-	450	779	1206	157	0	0,35	0,84	18,5	41	1,9	61	2,1	72	2,2
9	+	0	0	550	499	1206	220	20	0,4	0,40	17	37	2,9	52	3,3	60	3,8
10	-	0	0	450	714	1206	180	20	0,4	0,56	18	38,5	3,1	54,6	3,9	66	5,4
11	0	+	0	500	531	1206	226	20	0,45	0,03	18	27,5	2,2	40,2	2,9	45	3,8
12	0	-	0	500	679	1206	176	20	0,35	0,66	18	42,6	3,2	50	3,8	60	4,9
13	0	0	+	500	606	1206	200	40	0,4	0,27	19,5	37	3,5	47	4,3	57	5,5
14	0	0	-	500	606	1206	200	0	0,4	0,07	17,5	31,5	1,6	41	1,8	46	1,9
15	0	0	0	500	606	1206	200	20	0,4	0,21	17,5	37,8	2,6	48	3,3	55	4
16	0	0	0	500	606	1206	200	20	0,4	0,21	17,5	37,8	2,6	48	3,3	55	4
17	0	0	0	500	606	1206	200	20	0,4	0,21	17,5	37,8	2,6	48	3,3	55	4

Статистичний аналіз отриманих результатів експерименту дозволив розрахувати математичні моделі міцнісних параметрів бетону у віці 3, 7 та 28 діб (табл. 3.7) та на їх основі побудувати графічні залежності (рис. 3.13-3.16). При побудові графічних залежностей від двох факторів значення третього приймалося на основному (нульовому) рівні.

Таблиця 3.7 – Математичні моделі міцнісних параметрів сталевібробетону

Вихідний параметр		Математичні моделі
Витрата Melflux 2651f, %		$y=0,21-0,081 \cdot X_1-0,315 \cdot X_2+0,099 \cdot X_3+0,27 \cdot X_1^2+0,14 \cdot X_2^2-0,04 \cdot X_3^2+0,012 \cdot X_1 \cdot X_2-0,012 \cdot X_1 \cdot X_3-0,034 \cdot X_2 \cdot X_3$
Міцність при стиску у віці:	3 доби	$y=35,46-0,26X_1-7,7X_2-0,14X_3+4,171 X_1^2+1,47X_2^2+0,671 X_3^2-8,363X_1X_2-0,388 X_1X_3+0,213X_2X_3$
	7 діб	$y=46,20-3,9X_1-8,4X_2+0,42X_3+8,618 X_1^2+0,418 X_2^2-0,682 X_3^2-4,850X_1X_2-1,40X_1X_3+0,575X_2X_3$
	28 діб	$y=52,81-2,88X_1-11,09 X_2+2,83X_3+11,748X_1^2+2,298X_2^2+0,498X_3^2-6,70X_1X_2+1,80X_1X_3-2,70X_2X_3$
Міцність на розтяг при згині	3 доби	$y=2,74+0,1X_1-0,22X_2+0,63X_3+0,171X_1^2-0,129X_2^2-0,279X_3^2-0,625X_1X_2+0,275X_1X_3+0,12 X_2X_3$
	7 діб	$y=3,27-0,1X_1-0,41X_2+1,15X_3+0,365X_1^2-0,106X_2^2-0,194X_3^2-0,450X_1X_2-0,075X_1X_3-0,225X_2X_3$
	28 діб	$y=4,05-0,15X_1-0,44X_2+1,67X_3+0,532X_1^2-0,282X_2^2-0,368 X_3^2-0,388X_1X_2-0,087X_1X_3-0,213X_2 X_3$

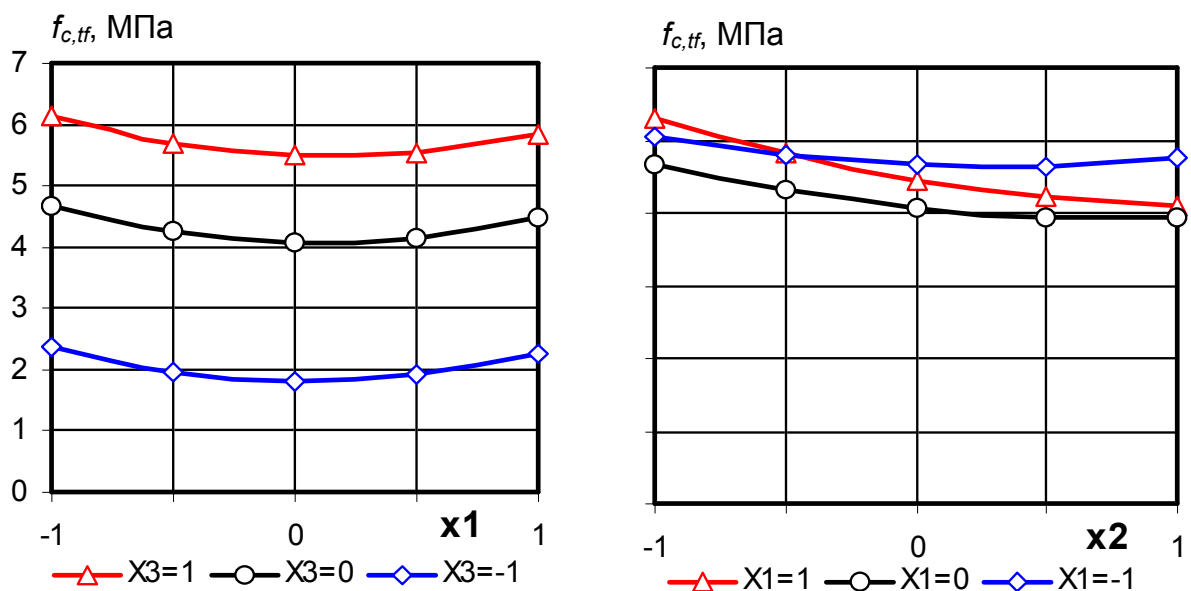


Рисунок 3.13 – Залежність міцності на розтяг при згині сталевібробетону у віці 28 діб від витрати цементу (X_1), В/Ц (X_2) та витрати фібри (X_3)

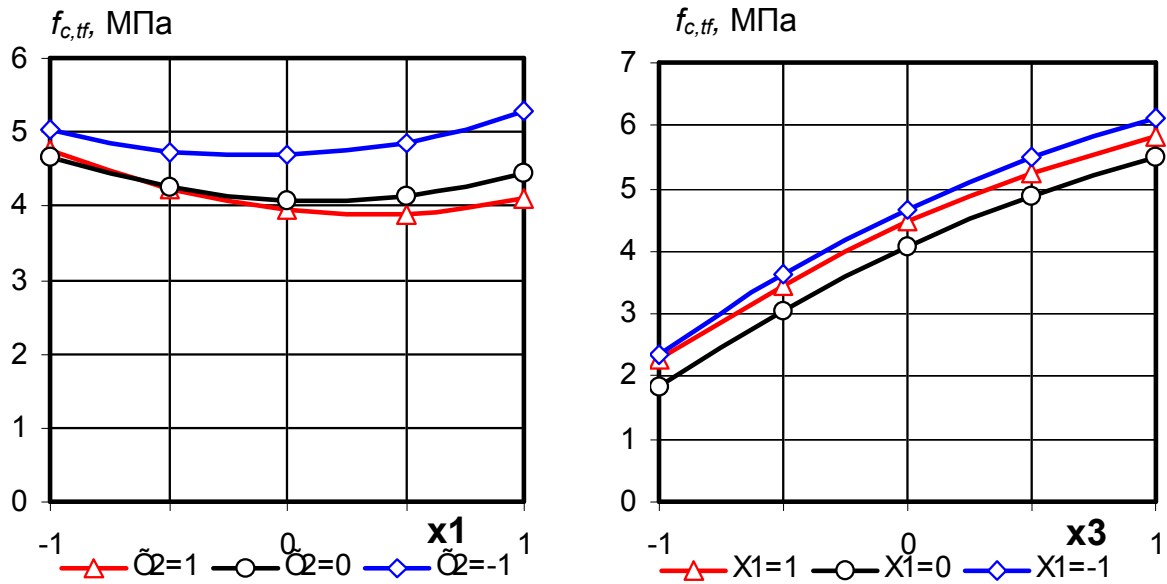


Рисунок 3.14 – Залежність міцності на розтяг при згині сталевібробетону у віці 28 діб від витрати цементу ($X1$), В/Ц ($X2$) та витрати фібри ($X3$)

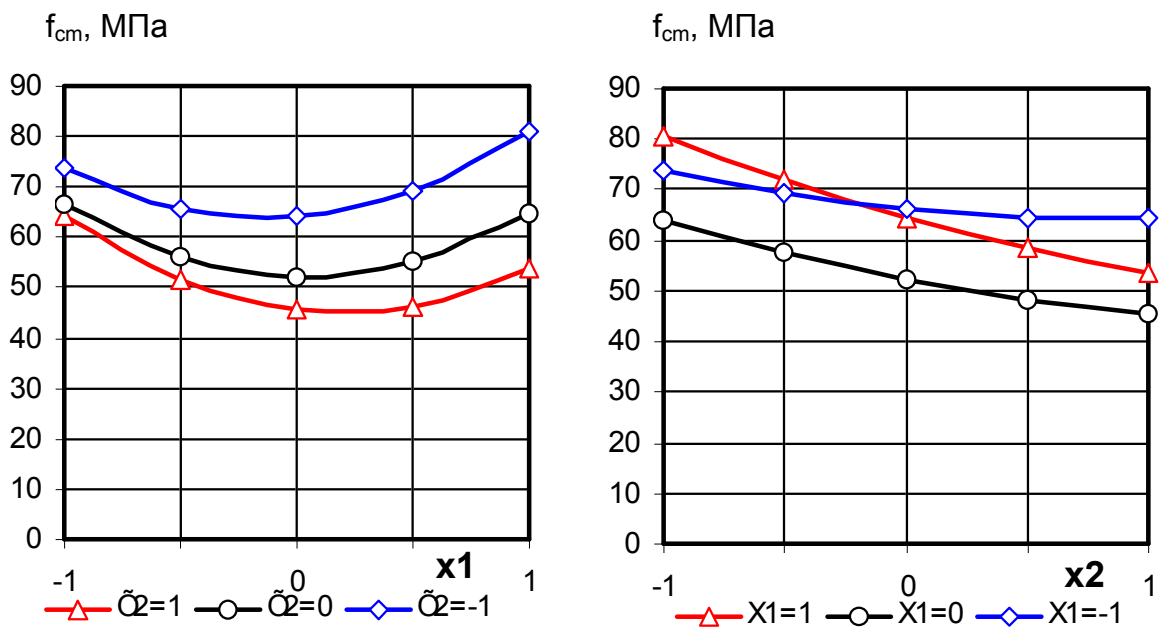


Рисунок 3.15 – Залежність міцності при стиску сталевібробетону у віці 28 діб від витрати цементу ($X1$) та В/Ц ($X2$)

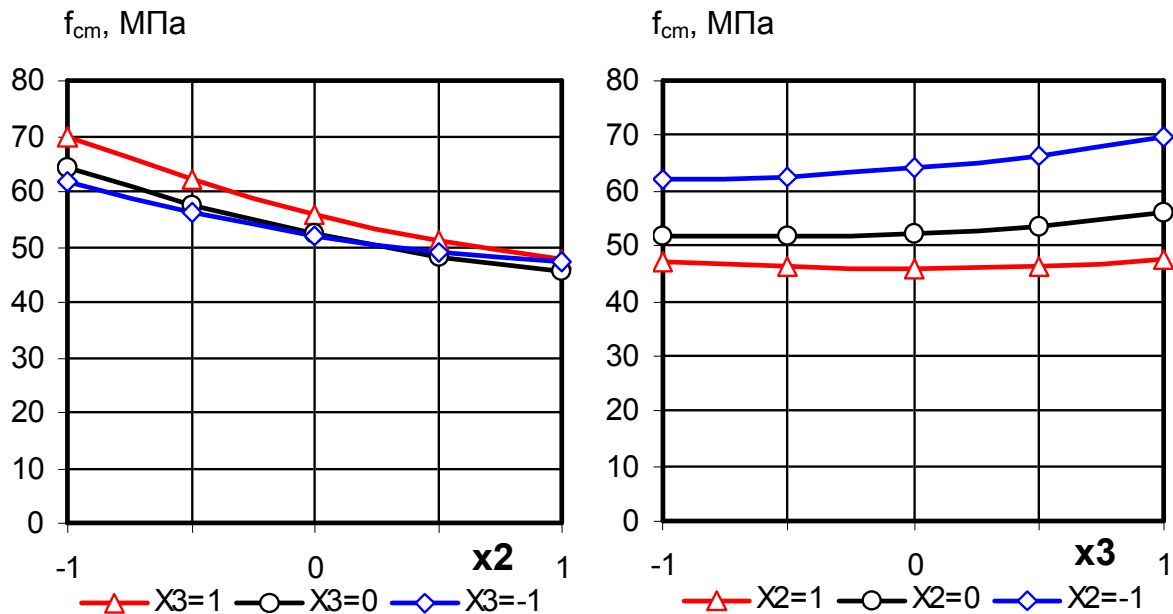
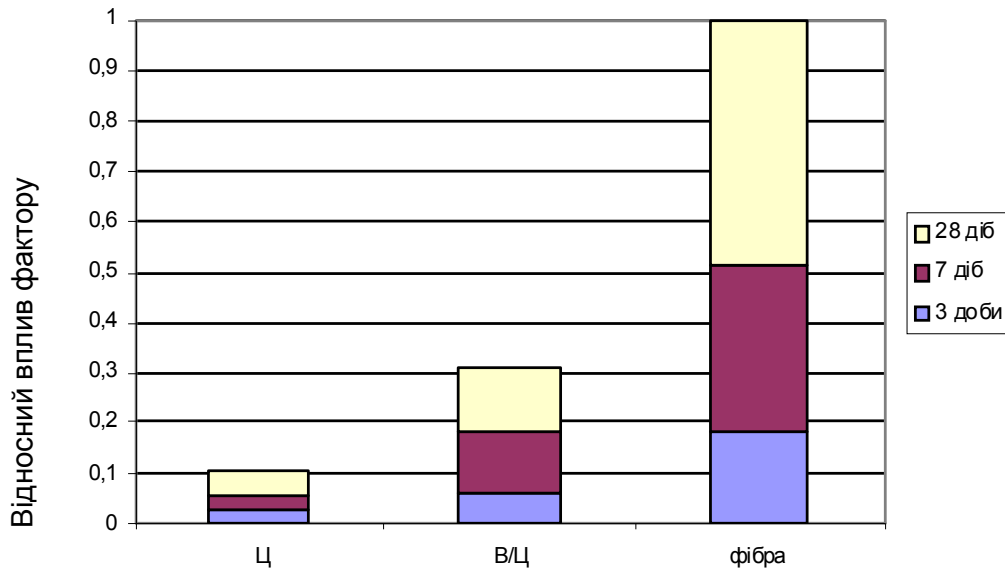


Рисунок 3.16 – Залежність міцності при стиску сталевібробетону у віці 28 діб від В/Ц (X_2) та витрати фібри (X_3)

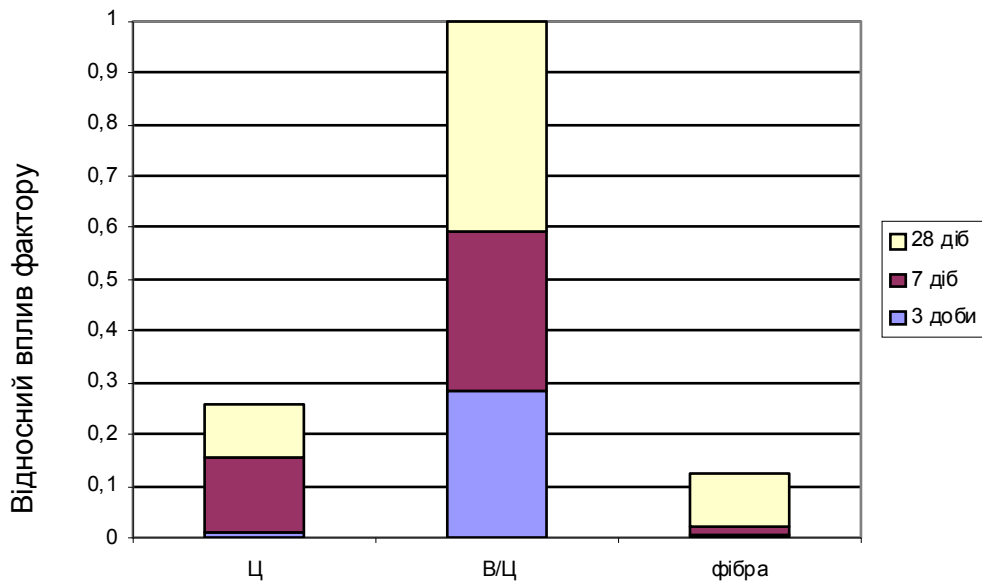
Аналіз моделей та графічних залежностей підтверджує найбільш суттєву роль дисперсного армування на значення міцності на розтяг при згині. Збільшення вмісту фібри від 0 до 40 кг/м³ приводить до зростання міцності на розтяг у віці 28 діб приблизно в 3 рази. Решта технологічних факторів практично не впливають на $f_{c,tf}$. Щодо міцності на стиск, очікувано найбільший вплив має фактор водоцементного відношення. Зміна вмісту фібри приводить до незначного збільшення міцності на розтяг при згині, причому це спостерігається при низьких значеннях В/Ц і витрат цементу.

Відносний вплив факторів на величини міцності при стиску та розтягу при згині у віці 28 діб можна прослідкувати з рис. 3.17. При цьому за одиницю прийнята величина впливу (лінійний коефіцієнт рівнянь регресії) фактору витрат фібри (X_3).

На другому етапі був застосований метод "крутого сходження" для знаходження оптимального значення витрати фібри.



а



б

Рисунок. 3.17 – Діаграма відносного впливу факторів на міцність на розтяг при згині (а) та міцність при стиску (б) сталевібробетону у віці 28 дїб

При "крутому сходженні" вміст цементу залишили постійним, враховуючи, що в обраному діапазоні при постійних значеннях В/Ц він чинить несуттєвий вплив на міцність, подальше зниження В/Ц (нижче 0,268) виявилось також не ефективним у зв'язку із суттєвим погіршенням легкоукладальності бетонної

суміші. Експериментальні дані, отримані при "крутому сходженні" наведені в табл.3.8.

Таблиця.3.8 – Реалізація методу "крутого сходження" при розрахунку оптимальних значень В/Ц та вмісту фібри в сталевібробетоні

№	Послідовність операцій крутого зходження	Дослідні фактори				
		Витрата цементу, кг/м ³	В/Ц	Витрата Фібри, кг/м ³	Міцність на розтяг при згині у віці 28 днів, МПа	Міцність при стиску у віці 28 днів, МПа
1.	Основний рівень, X_{i0}	500	0,4	20		
2.	Інтервал варіювання, ΔX_{i0}	50	0,05	20		
3.	Верхній рівень	550	0,45	40		
4.	Нижній рівень	450	0,35	0		
5.	Кодове значення змінних	X_1	X_2	X_3		
6	Досліди:					
	1	+	+	+	5,6	58
	2	+	+	-	2,2	54
	3	+	-	+	6,9	86
	4	+	-	-	3,1	82
	5	-	+	+	5,8	62
	6	-	+	-	2,6	69
	7	-	-	+	6,6	80
	8	-	-	-	2,2	72
	9	+	0	0	3,8	60
	10	-	0	0	5,4	66
	11	0	+	0	3,8	45
	12	0	-	0	4,9	60
	13	0	0	+	5,5	57
	14	0	0	-	1,9	46
	15	0	0	0	4,0	55
	16	0	0	0	4,0	55
17	0	0	0	4,0	55	
7	b_i^*		2,83	1,67		
8	$b_i \Delta X_{i0}$		0,142	33,4		
9	$\lambda = \frac{\mu}{b_i}; \mu = 1$		0,35	0,599		
10 11	Крок $\approx \lambda(b_i \Delta X_{i0})$		0,05	20		
	Досліди на лінії сходження					
	№1		0,318	40	7,0	94
	№2		0,268	60	8,9	98
	№3		0,268	80	8,6	92

b_i^* - відповідає коефіцієнту моделі (табл. 3.12), що характеризує вплив відповідного фактору на показники міцності на розтяг при згині.

За результатами крутого сходження отримано оптимальні значення технологічних факторів, що характеризують склад бетонної суміші ($\text{Ц}=550 \text{ кг/м}^3$; $\text{Ф}=60 \text{ кг/м}^3$; $\text{В/Ц}=0,27$). Це дозволяє збільшити міцність на розтяг при згині до 8,9 МПа, що майже в три рази перевищує міцність не армованого бетону, при цьому міцність на стиск досягає 98 МПа.

Наступний етап досліджень був присвячений встановленню оптимального вмісту сталевих фібри для виготовлення дрібнозернистого сталевібробетону з підвищеною міцністю на розтяг при згині. Для цього було проведено прямі дослідження, результати яких наведені в табл. 3.9 та на рис. 3.18. Дослідження проводили на дрібнозернистому бетоні із застосуванням фібри типу Ф1, збільшення вмісту якої, за результатами попередніх досліджень, призводить до інтенсивного зростання міцності бетону на розтяг при згині.

Таблиця 3.9 – Дослідження впливу кількості фібри на міцність при згині дрібнозернистого сталевібробетону

Фміст фібри, кг/м^3	Міцність при згині у віці 1 доба, МПа	Міцність при згині у віці 7 діб, МПа	Міцність при згині у віці 28 діб, МПа
0	5,11	7,42	8,62
20	5,35	8,29	10,18
40	5,55	8,93	11,61
60	5,79	9,65	12,17
80	5,94	10,33	12,53

Отримані результати вказують на те, що збільшення вмісту сталевих фібри на всьому діапазоні варіювання призводить до збільшення міцності дрібнозернистого сталевібробетону при згині у всі терміни твердіння. Проте отримані результати не дозволяють встановити оптимальну витрату фібри, яка б забезпечувала досягнення максимальної міцності на розтяг при згині. Тому метою роботи на наступному етапі досліджень було встановлено комплексного впливу на міцнісні характеристики дрібнозернистого сталевібробетону витрати цементу, фібри та водоцементного відношення. Для цього був реалізований

трехрівневий трьохфакторний, близький до D – оптимального, план [105]. Умови планування експерименту та результати досліджень наведені в табл. 3.10 та табл. 3.11 відповідно.

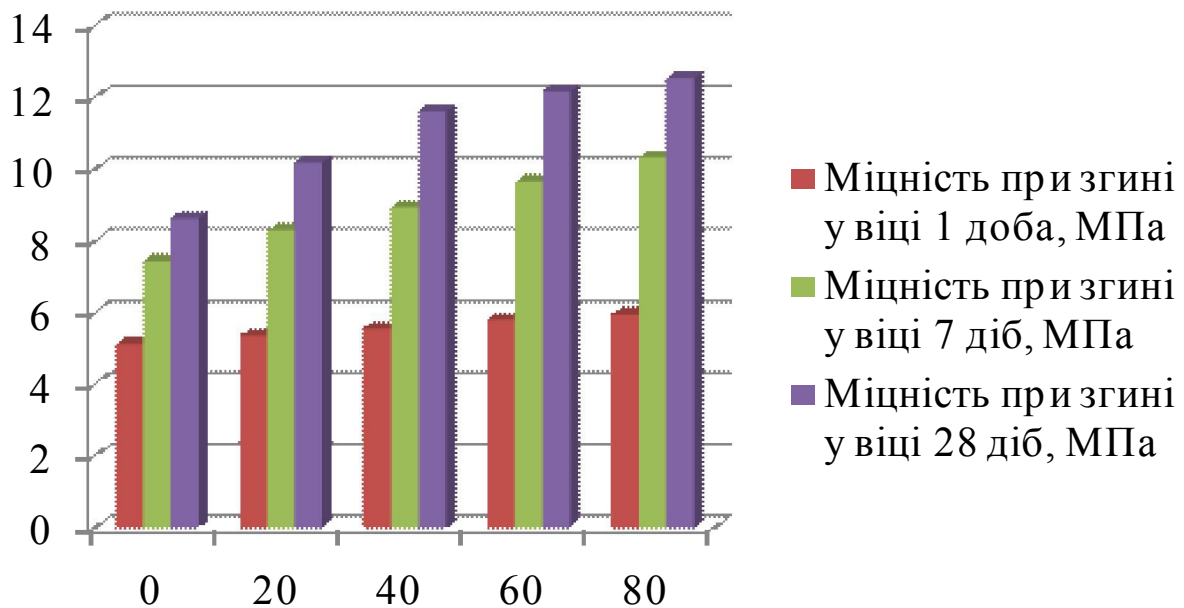


Рисунок 3.18 – Діаграма впливу вмісту фібри на міцність на розтяг при згині дрібнозернистого сталевібробетону

Таблиця 3.10 – Умови планування експерименту при визначенні параметрів складів сталевібробетону

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X_1	Витрата цементу, кг/м ³ (Ц)	450	500	550	50
2	X_2	В/Ц	0,3	0,35	0,4	0,05
3	X_3	Витрата фібри, кг/м ³ (Ф)	80	100	120	20

Після проведення обробки та статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі міцності дрібнозернистого сталевібробетону на стиск та розтяг при згині у вигляді поліноміальних рівнянь регресії. Результати обробки та статистичного аналізу експериментальних даних наведені в табл. 3.12 та на рис. 3.19-3.22.

Таблиця 3.11 – Експериментальні результати по визначенню параметрів складів сталевібробетону

№ т. плану	Кодовані значення факторів			Витрати компонентів, кг/м ³					В/Ц	Mel-flux, %	f_{cm}^1 , МПа	$f_{c,tf}^1$, МПа	f_{cm}^7 , МПа	$f_{c,tf}^7$, МПа	f_{cm}^{28} , МПа	$f_{c,tf}^{28}$, МПа
	X_1	X_2	X_3	Ц	П	Щ _{2..5}	В	Ф								
1	+	+	+	550	732	895	220	120	0,4	0,2	28,63	6,22	54,7	11,15	67,2	13,84
2	+	+	-	550	732	895	220	80	0,4	0,1	28,21	5,00	55,8	10,05	66,6	9,08
3	+	-	+	550	799	977	165	120	0,3	1,1	40,9	8,80	78,1	15,95	96,0	19,92
4	+	-	-	550	799	977	165	80	0,3	0,8	40,3	7,78	79,7	15,57	95,2	15,23
5	-	+	+	450	820	1002	180	120	0,4	0,4	23,8	6,64	49,1	13,91	57,3	14,90
6	-	+	-	450	820	1002	180	80	0,4	0,2	23	5,26	48,0	8,29	56,9	9,59
7	-	-	+	450	875	1069	135	120	0,3	1,3	34,1	7,50	71,0	15,27	83,9	17,06
8	-	-	-	450	875	1069	135	80	0,3	1	33,8	6,32	70,4	10,37	83,3	11,82
9	+	0	0	550	766	936	193	100	0,35	0,45	32,2	7,90	67,3	15,57	79,7	18,13
10	-	0	0	450	847	1036	158	100	0,35	0,27	30,7	7,38	64,0	14,35	75,8	16,95
11	0	+	0	500	776	948	200	100	0,4	0,3	24,5	6,72	53,4	13,32	65,3	15,49
12	0	-	0	500	837	1023	150	100	0,3	0,5	39,1	8,54	77,4	16,76	92,4	19,64
13	0	0	+	500	806	986	175	120	0,35	0,3	32,1	7,14	66,8	13,33	79,0	15,67
14	0	0	-	500	806	986	175	80	0,35	0,1	31,1	5,94	64,5	10,33	77,5	10,67
15	0	0	0	500	806	986	175	100	0,35	0,2	31,6	7,56	66,0	14,63	78,1	17,17
16	0	0	0	500	806	986	175	100	0,35	0,2	31,6	7,56	66,0	14,63	78,1	17,17
17	0	0	0	500	806	986	175	100	0,35	0,2	31,6	7,56	66,0	14,63	78,1	17,17

Таблиця 3.12 – Математичні моделі міцнісних параметрів дрібнозернистого сталевібробетону

Вихідний параметр		Математичні моделі
Міцність при стиску у віці:	1 доба	$f_{cm}^1 = 31,7 + 1,4 \cdot X_1 - 8 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_3 - 0,2 \cdot X_1^2 + 0,2 \cdot X_2^2 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2$
	7 днів	$f_{cm}^7 = 66,5 + 3,3 \cdot X_1 - 11,6 \cdot X_2 + 0,1 \cdot X_3 - 0,9 \cdot X_1^2 - 1,2 \cdot X_2^2 - 0,9 \cdot X_3^2 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,6 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,1 \cdot X_2 \cdot X_3$
	28 днів	$f_{cm}^{28} = 78,9 + 4,8 \cdot X_1 - 13,7 \cdot X_2 + 0,4 \cdot X_3 - 1,6 \cdot X_1^2 - 0,4 \cdot X_2^2 - X_3^2 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1 \cdot X_2 \cdot X_3$
Міцність на розтяг при згині у віці:	1 доба	$f_{c,tf}^1 = 7,56 + 0,26 \cdot X_1 - 0,91 \cdot X_2 + 0,6 \cdot X_3 + 0,077 \cdot X_1^2 + 0,07 \cdot X_2^2 - 1,02 \cdot X_3^2 - 0,43 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,042 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,05 \cdot X_2 \cdot X_3$
	7 днів	$f_{c,tf}^7 = 14,63 + 0,61 \cdot X_1 - 1,72 \cdot X_2 + 1,5 \cdot X_3 + 0,333 \cdot X_1^2 + 0,407 \cdot X_2^2 - 2,8 \cdot X_3^2 - 0,86 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,128 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,18 \cdot X_2 \cdot X_3$
	28 днів	$f_{c,tf}^{28} = 17,17 + 0,589 \cdot X_1 - 2,078 \cdot X_2 + 2,5 \cdot X_3 + 0,367 \cdot X_1^2 + 0,394 \cdot X_2^2 - 4 \cdot X_3^2 - 0,98 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,138 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,018 \cdot X_2 \cdot X_3$

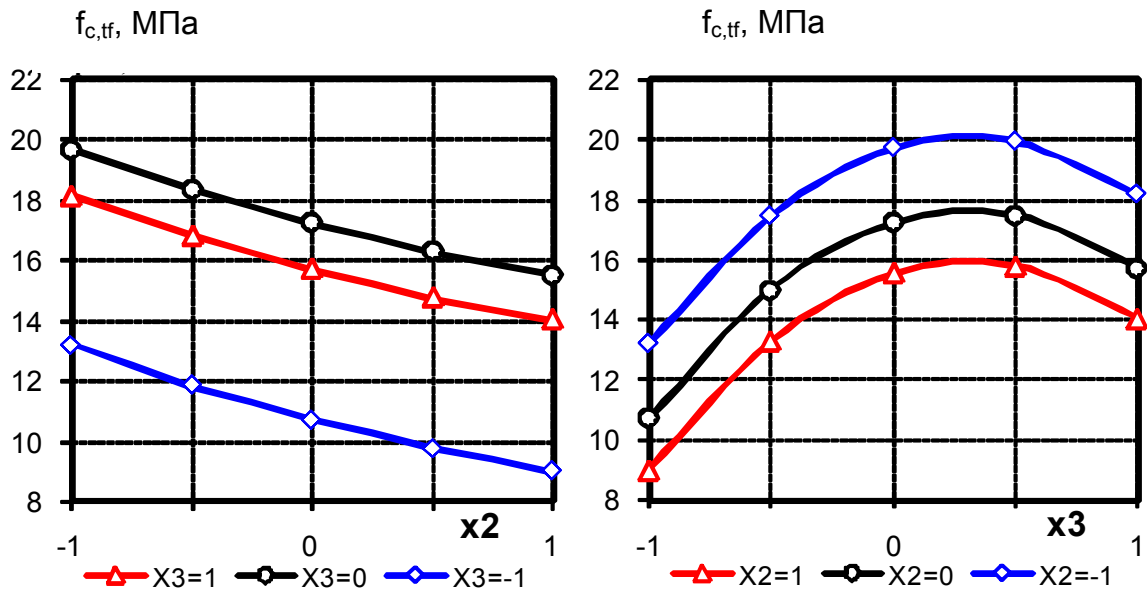


Рисунок 3.19 – Залежність міцності на розтяг при згині дрібнозернистого сталевібробетону у віці 28 днів від В/Ц (X_2) та витрати фібри (X_3)

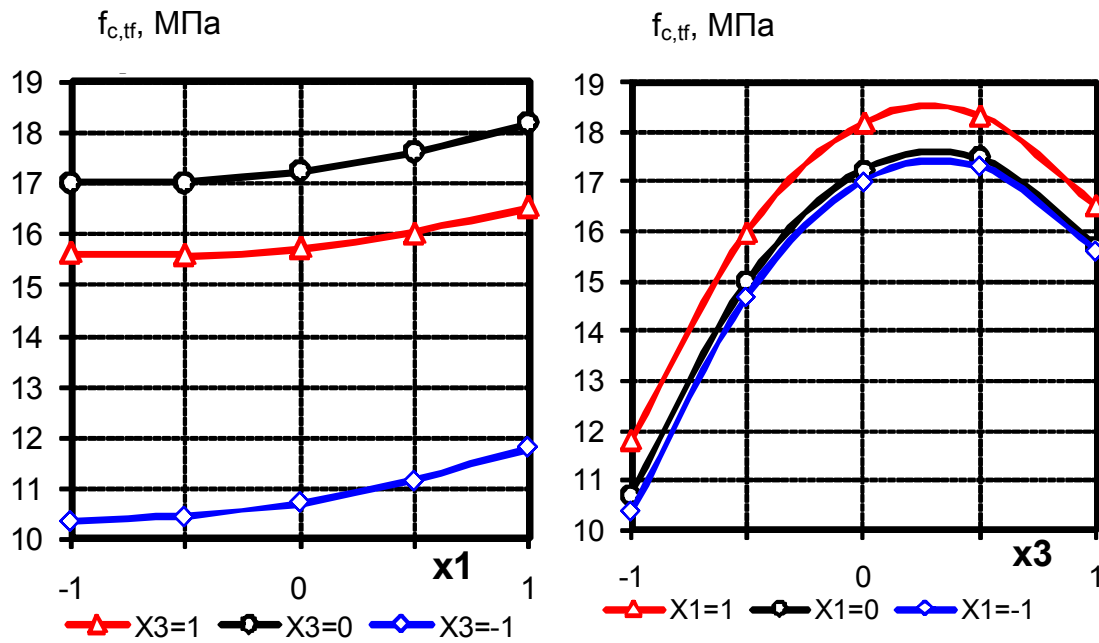


Рисунок 3.20 – Залежність міцності на розтяг при згині сталевібробетону у віці 28 діб від витрати цементу ($X1$) та витрати фібри ($X3$)

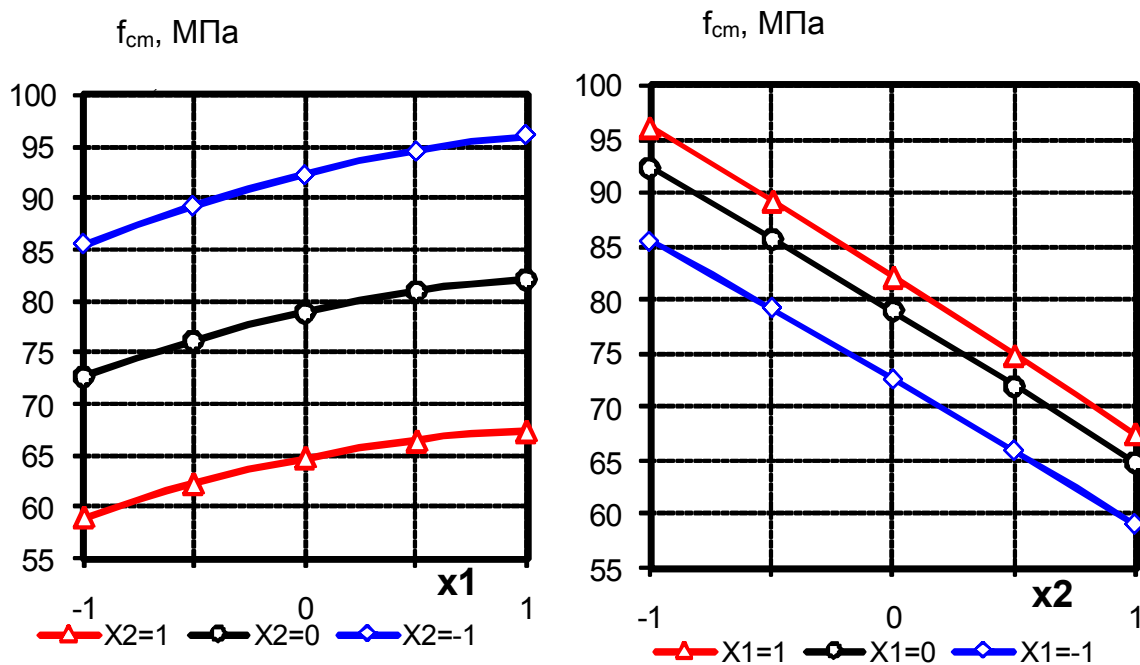


Рисунок 3.21 – Залежність міцності при стиску сталевібробетону у віці 28 діб від витрати цементу ($X1$) та В/Ц ($X2$)

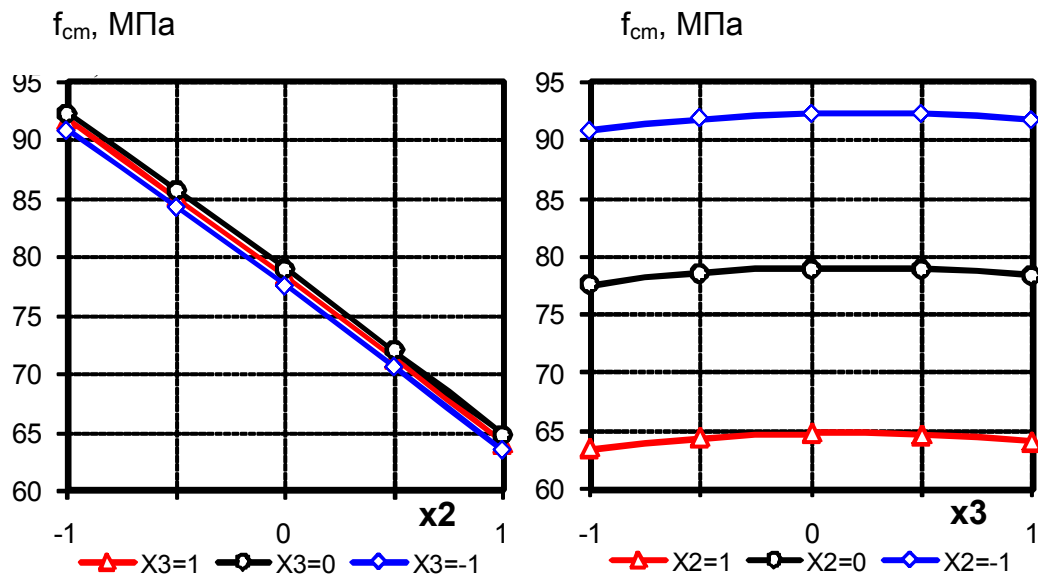


Рисунок 3.22 – Залежність міцності при стиску сталевібробетону у віці 28 діб від В/Ц (X_2) та витрати фібри (X_3)

Результати аналізу отриманих математичних моделей та побудованих на їх основі графічних залежностей свідчать про те, що як і у випадку із звичайним важким бетоном, найбільш суттєвий вплив на міцність дрібнозернистого сталевібробетону на розтяг при згині чинить вміст фібри, причому вплив даного фактору носить екстремальний характер. Збільшення вмісту фібри від 80 до 100 кг/м³ призводить до збільшення міцності на розтяг при згині в середньому на 40 %, подальше ж збільшення кількості дисперсної арматури суттєво не впливає на міцність дрібнозернистого сталевібробетону на розтяг при згині. Тобто у відповідності з отриманими експериментальними результатами було встановлено оптимальний вміст сталевібробетону, який забезпечує максимальну міцність фібробетону на розтяг при згині. Подальше збільшення вмісту дисперсної арматури призводить до зниження міцності, що обумовлено зменшенням товщини матричного шару настільки, що матеріал проявляє схильність до розшарування навіть при невеликих навантаженнях [109].

Щодо міцності на стиск, то аналіз отриманих експериментально-статистичних моделей дозволяє прийти до висновку, що найбільш суттєвим фактором, який впливає на міцність дрібнозернистих сталевібробетонів у різні терміни твердіння є водоцементне відношення, зменшення якого від В/Ц=0,4 до

$V/C=0,3$ призводить до збільшення міцності на 40% у віці 1 доба, на 30% у віці 7 діб та на 25% у віці 28 діб. Вплив даного фактору носить лінійний характер і він складає близько 80% впливу всіх інших факторів. Збільшення витрати цементу та сталеві фібри в варійованих межах при постійному водоцементному відношенні суттєво не впливає на міцність досліджуваних бетонів. За впливом варійованих факторів на міцність дрібнозернистого сталевібробетону на стиск їх можна розташувати в ряду: $X_2 > X_1 > X_3$.

Таким чином в результаті експериментальних досліджень було встановлено можливість отримання дрібнозернистого сталевібробетону, що характеризується міцністю при стику понад 90 МПа, при забезпеченні міцності при згині майже 20 МПа.

3.3. Вплив процедури введення сталевих волокон у бетонну суміш

Особливу увагу потрібно приділяти стадії приготування фібробетонної суміші, адже від якості перемішування компонентів будь-якого композиційного матеріалу залежать його властивості й довговічність.

Відомі кілька способів отримання бетонів, армованих сталевими фібрами [18]. Відповідно до першого способу введення компонентів здійснюється в наступній послідовності: спочатку перемішується насухо пісок з заповнювачем, потім вводиться необхідна кількість попередньо просіяних через сито фібр. Після цього в суміш додається цемент і вода з добавками. Перемішування компонентів здійснюється до забезпечення однорідного складу бетону. У ряді випадків волокно додають до заповнювача, попередньо перемішаному з водою, а після цього вводиться цемент і недостатню кількість води. Пошуки оптимальних методів введення сталевібробетону в бетонну суміш привели до розробки нових пропозицій.

Для вивчення даного питання був виконаний експеримент, метою якого було виявлення оптимального способу введення сталевібробетону в бетонну суміш і вивчення технологічних режимів приготування дисперсно-армованого

сталефібробетону. Для вирішення поставленої мети вивчалися два способи введення сталевих волокон в бетонну суміш.

Введення фібри в бетонну суміш можна здійснювати двома основними способами (табл. 3.13).

Таблиця 3.13 – Процедури введення компонентів бетонної суміші

Спосіб	Послідовність введення компонентів	
	Перший етап	Другий етап
1. "Класичний"	Щебінь+пісок+(цемент+СП)+вода <i>перемішування</i>	Фібра <i>перемішування</i>
2. "Сухий"	Щебінь+пісок+фібра+(цемент+СП) <i>перемішування</i>	Вода <i>перемішування</i>

Відповідно до першого способу попередньо до перемішаних сухих компонентів бетону, включаючи порошковий суперпластифікатор, додавалася необхідна кількість води. На другому етапі в приготовлену таким чином суміш, при безперервному перемішуванні, вводилася необхідна кількість просіяної крізь сито фібри.

За другим способом до перемішаних сухих компонентів (заповнювачів) вводилася необхідна кількість попередньо просіяної крізь сито фібри. Далі в суміш додають цемент, необхідну кількість води з пластифікуючими добавками і продовжують перемішування до отримання однорідного складу бетонної суміші.

Для порівняння двох способів введення фібри провели дослід на звичайному та дрібнозернистому фібробетонах при оптимальному вмісті фібри Ф1, що був визначений раніше.

Для звичайного важкого фібробетону вміст фібри складав 60 кг/м^3 ($\mu = 0,8\%$), для дрібнозернистого – 100 кг/м^3 ($\mu = 1,3\%$). Бетонні суміші готували на трьох значеннях рухомості (ОК = 10см, ОК = 15см, ОК = 20 см) при однаковому В/Ц = 0,35. Результати випробування зразків сталевібробетонів у віці 3, 7 та 28 діб наведені в табл. 3.14, 3.15.

Таблиця 3.14 – Перший спосіб введення фібри (класичний)

ОК, см	Міцність при стиску, МПа у віці			Міцність на розтяг при згині, МПа у віці		
	3 доби	7 діб	28 діб	3 доби	7 діб	28 діб
Важкий звичайний фібробетон						
10	55,6	73,3	92,3	1,8	2,6	2,8
15	55,9	72,6	91,4	3,9	5,6	7,8
20	62,3	77,8	96,2	4,8	7,5	8,9
Дрібнозернистий фібробетон						
10	53,1	69,8	87,2	2,5	3,4	4,2
15	54,8	68,3	86,8	6,2	8,7	11,3
20	56,2	71,3	93,5	7,5	10,6	13,6

Таблиця 3.15 – Другий спосіб введення фібри ("сухий")

ОК, см	Міцність при стиску, МПа у віці			Міцність на розтяг при згині, МПа у віці		
	3 доби	7 діб	28 діб	3 доби	7 діб	28 діб
Важкий звичайний фібробетон						
10	56,7	72,4	91,6	1,6	2,1	2,6
15	55,2	73,9	92,4	4	5,3	7,5
20	58	75	93,8	7,6	6,3	7,9
Дрібнозернистий фібробетон						
10	53,4	69	86,4	2,6	3,4	4,3
15	54,9	72,1	83,3	6,36	8,5	10,6
20	55,2	70,3	89	7,6	10,8	12,9

В процесі приготування сумішей спостерігалась чітка тенденція по ускладненню досягнення рівномірного розподілення фібри в бетоні при зменшенні рухомості суміші. Зокрема при ОК=10 см було важко досягнути однорідності фібробетонної суміші, в ній утворювались комки фібри (т.зв. "їжаки") і, відповідно, лишались значні ділянки неармованого бетону. Це, як видно з результатів (рис. 3.23), привело до суттєвого зниження міцності на розтяг при згині, значення яких майже не перевищує міцності неармованих зразків бетону. Міцність при стиску знижується не так значно, проте й це зниження також можна пояснити неоднорідністю структури бетону.

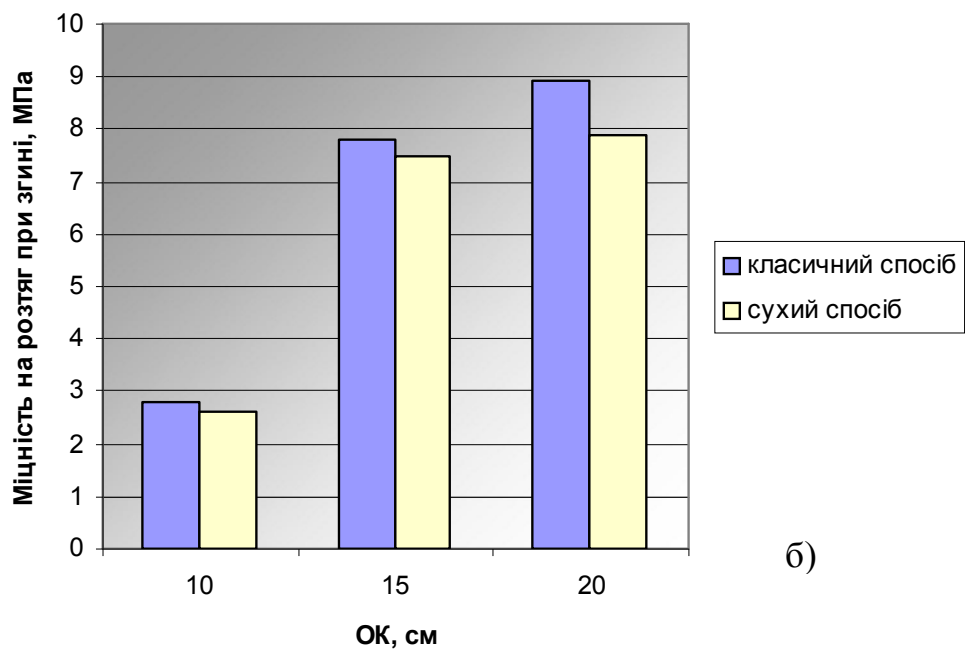
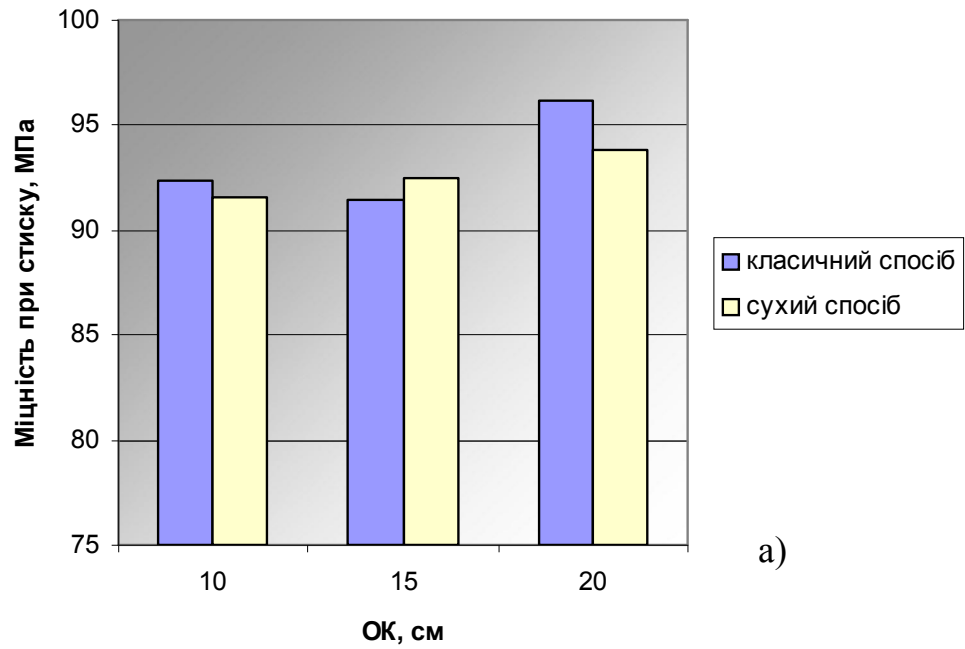
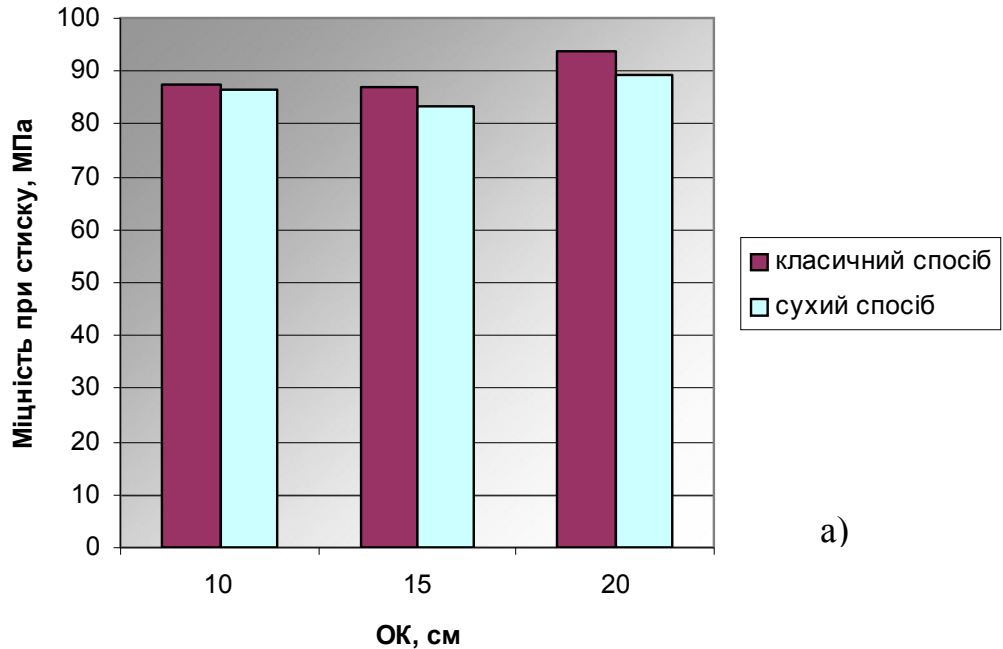
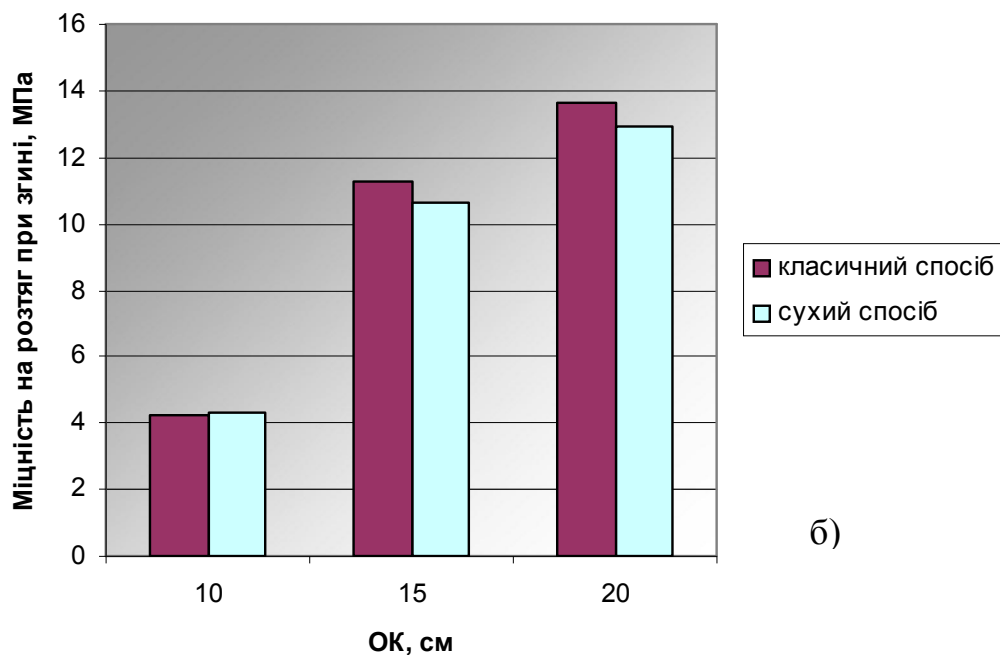


Рисунок 3.23 – Зміна міцності при стиску (а) та міцності на розтяг при згині (б) звичайного сталевібробетону у віці 28 діб в залежності від способу введення фібри та рухомості суміші

Порівнюючи два види фібробетону (рис. 3.23, 3.24) варто відзначити, що дрібнозерниста бетонна суміш була менш схильна до комкування волокон фібри при невисоких значеннях рухомостей. Малі розміри зерен заповнювача дозволяли легше розподіляти фібру в бетонній суміші, що приводило до збільшення її однорідності і, тим самим, міцнісних показників.



а)



б)

Рисунок 3.24 – Зміна міцності при стиску (а) та міцності на розтяг при згині (б) дрібнозернистого сталеві фібробетону у віці 28 днів в залежності від способу введення фібри та рухомості суміші

Порівняння двох способів приготування фібробетонної суміші показує, що і класичний, і "сухий" способи приготування даються співставні результати з незначним переважанням класичного способу (переважно для високорухомих сумішей), що можна пояснити більшою загальною тривалістю перемішування компонентів суміші для нього у порівнянні із "сухим" способом.

При збільшенні рухомості до 15 см комкування фібри ставало менш відчутним, а при 20 см – взагалі не спостерігалось.

3.4. Покращення властивостей фібробетонів за рахунок орієнтування фібри

Створення орієнтованої структури фібри в сталевібробетоні, при якій фібра спрямована уздовж діючих у виробі розтягуючих навантажень є важливою технічною і науковою задачею. Така орієнтація дозволяє підвищити міцність при розтягуванні в 2...4 рази. На даний момент існує безліч способів створення орієнтованої структури фібри, більшість з яких, в залежності від використаних методів можна звести до наступних: стиснення фібри опалубкою, роликове пресування, роздільне, пошарове укладання фібри і бетонної суміші, механічна орієнтація фібри, що досягається пропусканням суміші через спеціальні сітки, набризг фібри в суміш з великою швидкістю, інтенсивне вібрування суміші, при якому фібра займає горизонтальне положення, формування виробів при дії магнітного поля.

Л.Г. Курбатовим і В.П. Романовим встановлено [110], що орієнтація фібри стисненням опалубки можлива при формуванні виробів з товщиною меншої довжини фібри. Розрахунками встановлено, що при співвідношенні довжини фібри до товщини конструкції більше 2 досягається орієнтація фібри практично в одному напрямку.

Грунтовні дослідження, з вивчення властивостей сталевібробетону роликового пресування, проведені О.М. Обуховим [111]. Він пропонує використовувати даний вид бетону для виготовлення тонкостінних виробів. Зокрема, була виготовлена та випробувана партія декоративних плиток для

підлоги товщиною 15 см в результаті чого було встановлено, що вони характеризуються в 2 рази нижчою стиранистю в порівнянні із звичайним бетоном. В.Н. Беленьким [112] розроблена роторно-ударна технологія формування, при якій із бункера подається суміш під спеціальний ротор, який розрівнює її в тонкі плити. Л.Г. Курбатовим в роботі [113] пропонується спосіб формування і ущільнення фібробетону за допомогою спеціальних ковзанок. Однак, ці способи не підходять для виготовлення виробів з товщиною, яка перевершує довжину фібр, і, крім того, з їх допомогою неможливо отримувати одноосову орієнтацію фібри.

Ф.Н. Рабиновичем [9] відзначається, що при вібрації сталеві фібробетонної суміші фібра повинна займати горизонтальне положення. Однак, проведені Г.В. Копанським дослідження [114] показали, що при тривалій інтенсивній вібрації відбувається розшарування сталеві фібробетонної суміші, внаслідок чого фібра опускаються в нижню частину виробу. Таким чином, даним способом орієнтації потрібно користуватися з великою обережністю. О.В. Коротішевський [115] рекомендує при виготовленні тонкостінних конструкцій (менше 2 см) використовувати набризк фібробетонної суміші, який дозволяє здійснювати спрямований розподіл волокон, а при товщині 3...5 см – застосовувати звичайні методи формування. Е.А. Шабловський і С.В. Снятков [116] запатентували спосіб набризку фібри з високою швидкістю під кутом до бетонної суміші. Однак, такі способи пов'язані із застосуванням унікального дорогого устаткування і вимагають модернізації всього технологічного процесу.

Пропонуються і зовсім екзотичні способи виготовлення орієнтованого сталеві фібробетону. Так, роботи [117, 118] присвячені екструдуванню суміші, а в патенті для забезпечення певної орієнтації фібри пропонується пропускати через суміш спеціальну сітку.

Поряд з перерахованими вище способами існує метод орієнтації сталевих фібр із застосуванням магнітного поля, заснований на властивості фібри повертатися уздовж його силових ліній. У роботах Л.Г. Курбатова і Ф.Н. Рабиновича [9, 113] згадана можливість такої орієнтації як перспективний спосіб,

що вимагає вивчення. Вперше ідея орієнтації сталевих фібр магнітним полем з'явилася на початку 70-х років. У роботі С.Ю. Шакірова, Д.В. Шаріпова [119] виготовлено сталевібетонні плити з орієнтованою постійним магнітним полем фіброю. Як фібра використовувалися короткі (1...2 см) відрізки сталеві стружки товщиною 1...2 мм, при цьому було отримано зразки з міцністю на розтяг при згині до 24 МПа.

В.В. Беспаловим [120] запропонований спосіб формування сталевібетонних виробів, при якому фібра орієнтуються уздовж силових ліній поля. Для зменшення величини індукції поля, необхідної для орієнтації фібр, фівбетону суміш одночасно віврують на вівроплощадці.

Момент сили, що необхідний для орієнтування фібри в суміші розраховують за формулою:

$$M = \tau_0 \times d \times l^2 / 6, \quad (3.2)$$

де d – діаметр фібри, l – довжина фібри, τ_0 – граничне напруження зсуву суміші.

Потужність, яка поглинається сталевібетонною сумішшю при вівруванні під дією магнітного поля залежить від циклічної характеристики поля (ω), коефіцієнту армування (μ), середньої густини суміші (ρ) та її в'язкості (η), насиченої намагніченості сталі (J):

$$W = \frac{\rho (BJd^2) \mu \omega}{2\pi (l\eta)^2}. \quad (3.3)$$

Граничне напруження зсуву (τ_0) і в'язкість суміші (η) знижуються при збільшенні її рухомості [121].

На наступному етапі досліджень встановлювали можливість покращення фізико-механічних властивостей, а саме міцності на розтяг при згині, дрібнозернистого сталевібетону шляхом забезпечення ефекту орієнтування фібри при ущільненні бетонної суміші різної рухомості на вівромайданчику з та без використання дії магнітного поля. Вміст фібри складав 20, 40, 60, 80 та 100 кг/м³, а рухомість бетонної суміші змінювалась в діапазоні від 7 до 21 см. Необхідна рухомість бетонної суміші забезпечувалась підбором вмісту суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f.

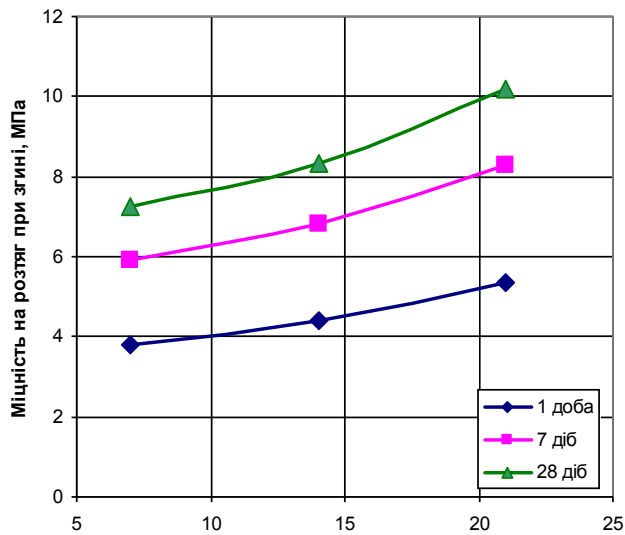
Результати досліджень наведені в табл. 3.16-3.20 та на рис. 3.25-3.29.

Таблиця 3.16 – Вплив орієнтування фібри на міцнісні характеристики дрібнозернистого сталевібробетону з вмістом фібри 20 кг/м³

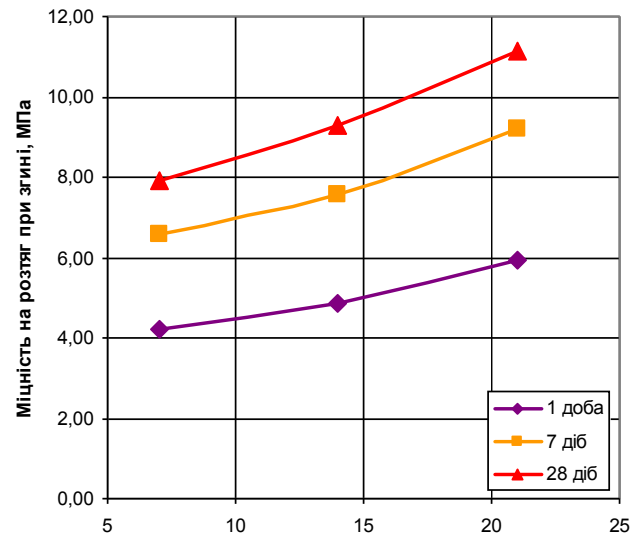
№	В/Ц	Рухомість суміші (ОК), см	Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба $f_{c,tf}^1$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб $f_{c,tf}^{28}$, МПа	
			Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем
1	0,30	7	3,82	4,23	5,92	6,58	7,27	7,90
2	0,30	14	4,39	4,85	6,8	7,55	8,34	9,30
3	0,30	21	5,35	5,92	8,29	9,21	10,18	11,13

Таблиця 3.17 – Вплив орієнтування фібри на міцнісні характеристики дрібнозернистого сталевібробетону з вмістом фібри 40 кг/м³

№	В/Ц	Рухомість суміші (ОК), см	Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба $f_{c,tf}^1$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб $f_{c,tf}^{28}$, МПа	
			Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем
1	0,30	7	4,02	4,69	6,01	6,93	8,41	9,28
2	0,30	14	4,44	5,17	6,63	7,65	9,29	10,24
3	0,30	21	5,55	6,47	8,29	9,57	11,61	12,70

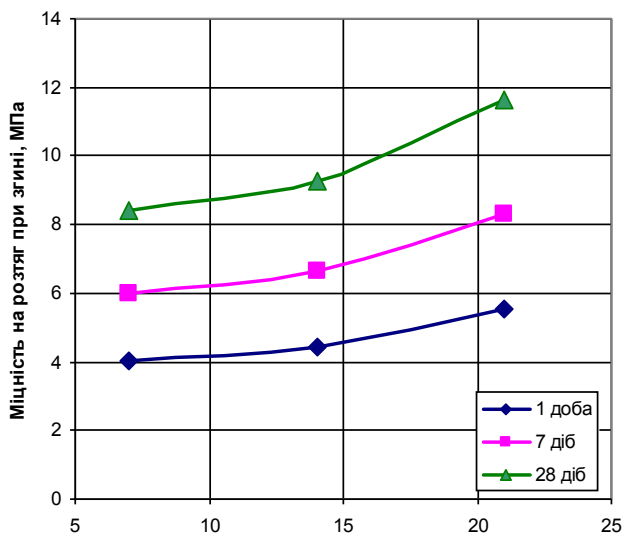


а)

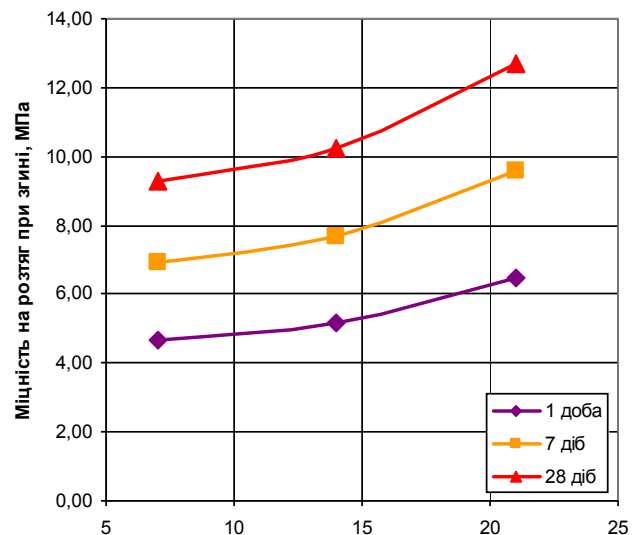


б)

Рисунок 3.25 – Залежність міцності дрібнозернистого сталевібробетону на розтяг при згині від рухомості бетонної суміші (ОК) з вмістом фібри 20 кг/м³: а) вібрування без дії магнітного поля; б) вібрування при дії магнітного поля



а)

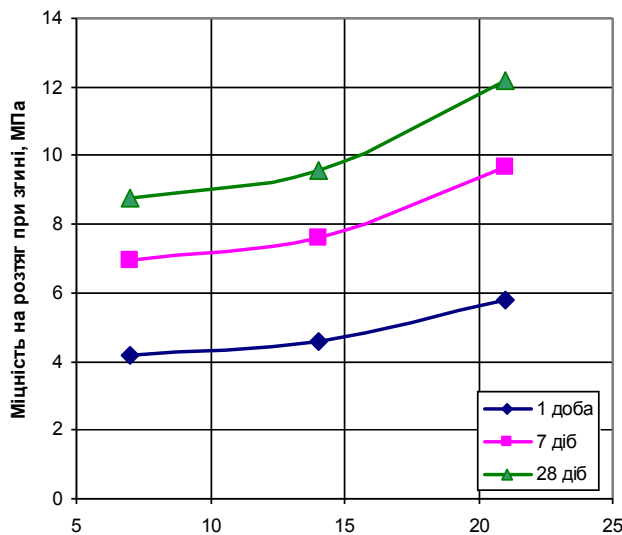


б)

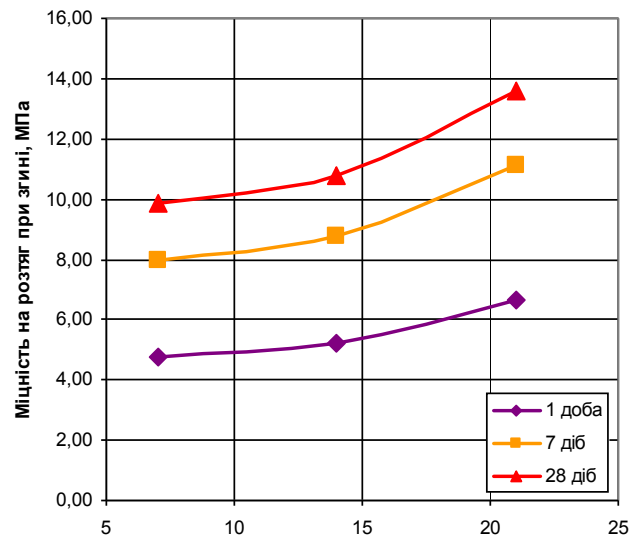
Рисунок 3.26 – Залежність міцності дрібнозернистого сталевібробетону на розтяг при згині від рухомості бетонної суміші (ОК) з вмістом фібри 40 кг/м³: а) вібрування без дії магнітного поля; б) вібрування при дії магнітного поля

Таблиця 3.18 – Вплив орієнтування фібри на міцнісні характеристики дрібнозернистого сталевібробетону з вмістом фібри 60 кг/м³

№	В/Ц	Рухомість суміші (ОК), см	Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба $f_{c,tf}^1$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб $f_{c,tf}^{28}$, МПа	
			Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем
1.	0,30	7	4,17	4,77	6,94	7,99	8,76	9,84
2.	0,30	14	4,56	5,22	7,6	8,75	9,58	10,80
3.	0,30	21	5,79	6,63	9,65	11,11	12,17	13,60



а)

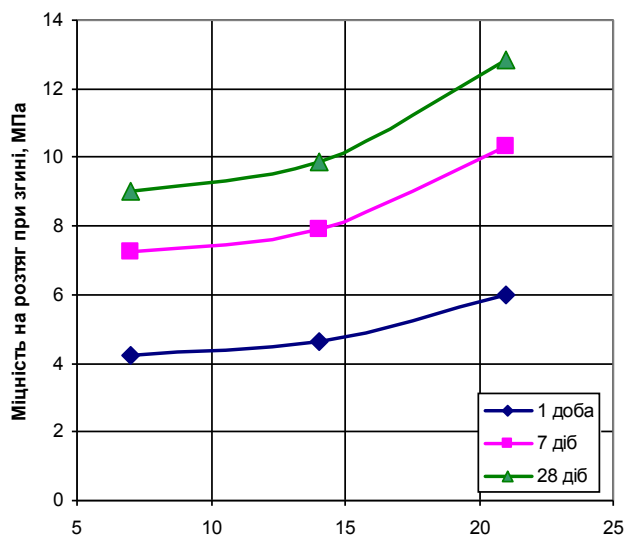


б)

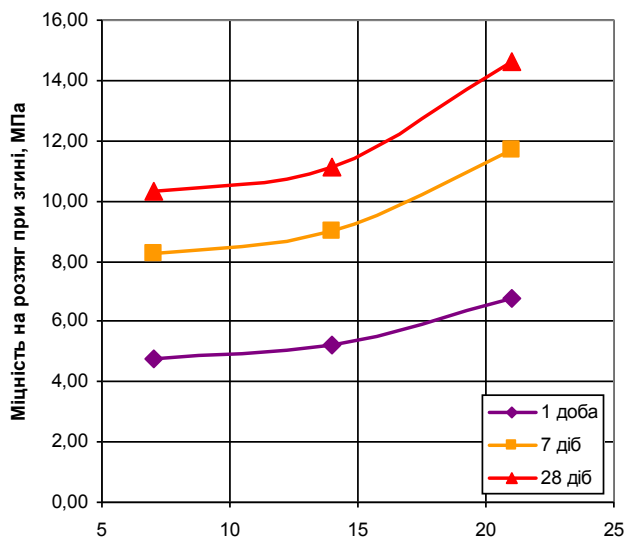
Рисунок 3.27 – Залежність міцності дрібнозернистого сталевібробетону на розтяг при згині від рухомості бетонної суміші (ОК) з вмістом фібри 60 кг/м³: а) вібрування без дії магнітного поля; б) вібрування при дії магнітного поля

Таблиця 3.19 – Вплив орієнтування фібри на міцнісні характеристики дрібнозернистого сталевібробетону з вмістом фібри 80 кг/м³

№	В/Ц	Рухомість суміші (ОК), см	Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба $f_{c,tf}^1$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб $f_{c,tf}^{28}$, МПа	
			Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем
1.	0,30	7	4,23	4,76	7,26	8,24	9,03	10,34
2.	0,30	14	4,62	5,19	7,93	8,99	9,86	11,10
3.	0,30	21	6,01	6,75	10,31	11,69	12,82	14,60



а)

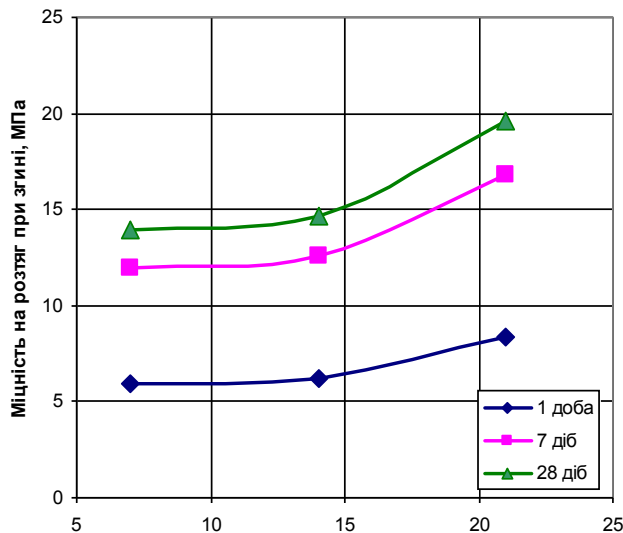


б)

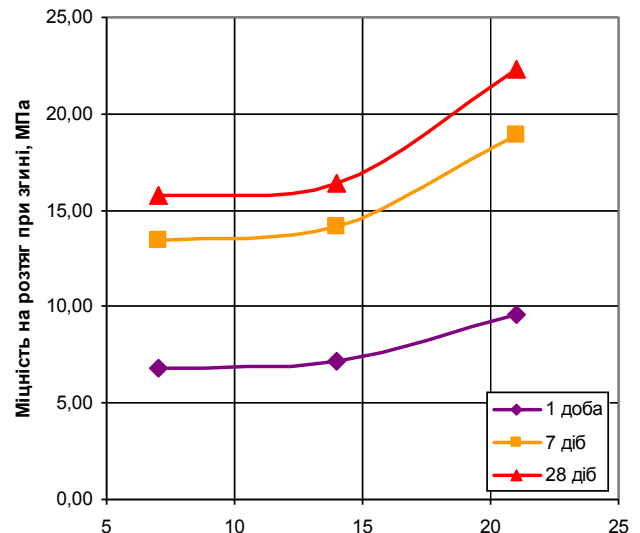
Рисунок 3.28 – Залежність міцності дрібнозернистого сталевібробетону на розтяг при згині від рухомості бетонної суміші (ОК) з вмістом фібри 80 кг/м³: а) вібрування без дії магнітного поля; б) вібрування при дії магнітного поля

Таблиця 3.20 – Вплив орієнтування фібри на міцнісні характеристики дрібнозернистого сталевібробетону з вмістом фібри 100 кг/м³

№	В/Ц	Рухомість суміші (ОК), см	Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба $f_{c,tf}^1$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб $f_{c,tf}^{28}$, МПа	
			Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем
1.	0,30	7	5,94	6,79	11,95	13,42	13,91	15,77
2.	0,30	14	6,25	7,15	12,57	14,12	14,63	16,40
3.	0,30	21	8,37	9,58	16,85	18,92	19,61	22,30



а)



б)

Рисунок 3.29 – Залежність міцності дрібнозернистого сталевібробетону на розтяг при згині від рухомості бетонної суміші (ОК) з вмістом фібри 100 кг/м³: а) вібрування без дії магнітного поля; б) вібрування при дії магнітного поля

Таким чином, встановлено позитивний вплив на фізико-механічні характеристики фібробетону орієнтування сталеві фібри перпендикулярно робочому навантаженню, яке досягається віброущільненням високорухомих бетонних сумішей та підсилюються при дії магнітного поля (рис 3.30).

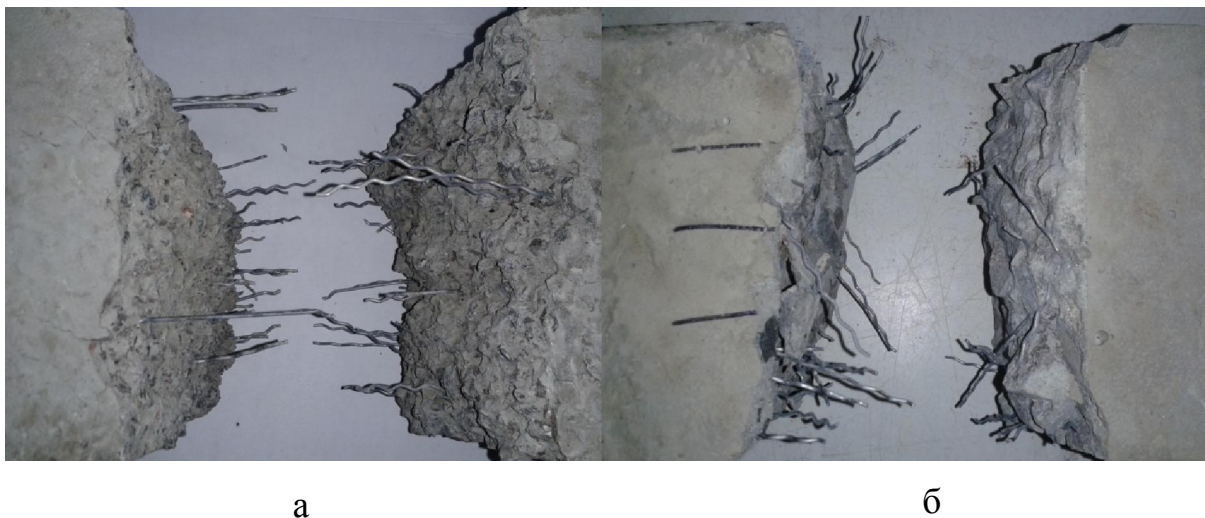


Рисунок 3.30 – Вигляд перерізу зруйнованого зразка із орієнтованою (а) та не орієнтованою (б) фіброю

Отримані результати показали, що найбільш суттєво на міцність при згині дрібнозернистого сталеві фібробетону впливає витрата сталеві фібри, при збільшенні вмісту якої від 20 до 100 кг/м³ міцність збільшується майже вдвічі. Також позитивно на міцність дрібнозернистого сталеві фібробетону, при всіх інших рівних умовах, впливає збільшення рухомості бетонної суміші, що пов'язано із підсиленням ефекту орієнтування сталеві фібри при віброущільненні високорухомих бетонних сумішей. Внаслідок збільшення рухомості з 7 до 21 см, зменшується в'язкість бетонної суміші і у відповідності з [121] суттєво знижуються енерговитрати необхідні для забезпечення орієнтації сталеві фібри в одному напрямку. Експериментальними дослідженнями встановлено, що збільшення рухомості бетонної суміші, при всіх інших рівних умовах, призводить до збільшення міцності при згині дрібнозернистого сталеві фібробетону в середньому на 40 %, що пов'язано із збільшенням кількості фібри розташованої перпендикулярно робочому навантаженню при випробуваннях. Також до деякого підсилення ефекту орієнтування сталеві

фібри призводить формування виробів шляхом віброущільнення при дії магнітного поля. При цьому приріст міцності складає в середньому 10...14 %, проте ключовим фактором залишається саме рухомість бетонної суміші.

Матеріали розділу 3 опубліковано автором у працях [122-126].

Висновки до розділу

1. На основі аналізу комплексу експериментально-статистичних моделей міцнісних параметрів сталевібробетонів встановлено ефективність застосування для важких та дрібнозернистих бетонів хвилястої сталевібро, що має підвищену поверхню зчеплення з бетоном. Отримані кількісні залежності, що характеризують вплив водоцементного відношення та вмісту фібри на міцність сталевібробетонів при стиску та розтяг при згині а також їх співвідношення. Показано, що застосування дрібнозернистого бетону на досліджуваних видах фібри дозволяє підвищити коефіцієнт ефективності дисперсного армування (тобто співвідношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску) більше ніж у два рази у порівнянні з неармованими бетонами і на 20...25 % у порівнянні з крупнозернистими.

2. Вивчена кінетика зростання міцності досліджуваних вібробетонів і показано, що при В/Ц в межах 0,35...0,4 через 1 добу можливе досягнення до 50% від марочної міцності як при стиску, так і на розтяг при згині. При В/Ц < 0,35 марочна міцність звичайного важкого і дрібнозернистого бетонів знаходяться в межах, характерних для високоміцних бетонів і складає 60...100 МПа при стиску.

3. За допомогою експериментально-статистичних моделей за умов забезпечення максимальних значень міцності на розтяг при згині і, відповідно, коефіцієнта ефективності дисперсного армування з використанням методу "крутого сходження" визначали оптимальний вміст сталевібро. Встановлено, що при застосуванні хвилястої фібри її оптимальний вміст в досліджуваних вібробетонах з витратою цементу 450...550 кг/м³ при однаковій рухомості (15...20 см) складає 60 кг/м³ ($\varphi = 0,76\%$) – для звичайного важкого бетону і 100

кг/м³ ($\varphi = 1,27\%$) – для дрібнозернистого бетону. При оптимальних значеннях вмісту фібри для обох видів фібробетону коефіцієнт ефективності дисперсного армування збільшується на 25...40%.

4. Виконані порівняльні дослідження способів введення фібри в бетонну суміш: з попереднім введенням в суху суміші і з введенням в готову бетонну суміш. Встановлена можливість застосування обох методів введення фібри. При достатній тривалості та інтенсивності перемішування міцнісні параметри сталеві фібробетонів, отриманих при двох способах введення, відрізняються несуттєво. Вибір методу введення фібри повинен враховувати конкретні технологічні можливості даного підприємства. Однорідність розподілення фібри в бетонній суміші залежить в першу чергу від її рухомості. Найбільша однорідність розподілення для дрібнозернистого фібробетону досягається при застосуванні високорухомих бетонних сумішей з $OK \geq 15$ см.

5. Додатковий ефект дисперсного армування на міцнісні властивості сталеві фібробетонів забезпечує, як показали експериментальні дослідження, орієнтація сталеві фібри під дією магнітного поля. Цей ефект стає суттєвим в міру збільшення рухомості бетонної суміші і дозволяє підвищити міцність на розтяг при згині дрібнозернистого сталеві фібробетону до 15 %. Вплив магнітного поля на орієнтування сталеві фібри ефективно суміщати з її вібруванням. Відзначено позитивний вплив на ефект орієнтування фібри добавок суперпластифікаторів, завдяки збільшенню тиксотропії в процесі вібрування.

РОЗДІЛ 4

МІЦНІСТЬ ФІБРОБЕТОНУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ З КОМПОЗИЦІЙНИМ ДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ

Для визначення можливості одержання полідисперсно армованого фібробетону з використанням сталевोї та базальтової (поліпропіленової) фібри із забезпеченням рівномірності їх розподілу в одержуваній структурі, були виготовлені серії поліармованих фібробетонних зразків. За базовий був прийнятий наступний склад дрібнозернистого бетону: портландцемент – 500 кг/м³, відношення заповнювача (щебінь фракції 2...5 мм : пісок = 0,55:0,45) до цементу складало 3,6 до 1 (за масою). В/Ц суміші складало 0,35. Необхідна рухомість суміші 13...15 см досягалася за рахунок введення добавки суперпластифікатора Melflux 2651f.

Використовували сталеву хвилясту фібру Ф1 в кількостях 80 і 120 кг/м³ бетону. Для отримання поліармованої композиції використовували базальтову фібру довжиною 12 і 24 мм та поліпропіленову фібру довжиною 12 та 18 мм. При цьому вміст базальтової фібри змінювався в межах від 0 до 6 кг/м³, а поліпропіленової – від 0 до 2 кг/м³.

Приготування фібробетону із композиційним дисперсним армуванням проводили в такій послідовності. У розчин пластифікатора вводили базальтову або поліпропіленову фібру і перемішували в лабораторному змішувачі з вертикальним валом протягом 40-60 с. У розпушене таким чином волокно додавали цемент і знову здійснювали перемішування до отримання однорідної суспензії. Потім в отриману суспензію додавали заповнювач відповідно до прийнятого дозування. Нарешті на останньому етапі, при безперервному перемішуванні суміші, вводилася необхідна кількість просіяного крізь сито сталеві фібри. Така технологія дозволила виключити комкування волокон і забезпечити необхідну однорідність композиційного дисперсноармованого бетону.

4.1. Вплив вмісту та співвідношення металевої та неметалевої фібри на міцність фібробетону

В табл. 4.1 представлені результати визначення міцності фібробетонів на основі сталевий та базальтової фібри при різних комбінаціях полідисперсного армування.

Таблиця 4.1 – Міцність фібробетонних зразків з різним вмістом та співвідношенням сталевий та базальтової фібри

Витрата сталевий фібри, кг/м ³	Витрата базальтової фібри, кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка базальтової фібри в загальному об'ємі армування n	Міцність при стиску у віці 7 діб f_{cm}^7 , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа
Базальтова фібра ($l = 12$ мм)					
80	0	1,03	0,00	64,5	10,3
	2	1,10	0,07	65,2	12,1
	4	1,18	0,13	67,1	12,4
	6	1,25	0,18	66,2	10,2
120	0	1,54	0,00	66,8	13,3
	2	1,61	0,05	66,5	14,8
	4	1,69	0,09	69,2	14,9
	6	1,76	0,13	65,4	11,5
Базальтова фібра ($l = 24$ мм)					
80	0	1,03	0,00	64,5	10,3
	2	1,10	0,07	67,2	11
	4	1,18	0,13	63,1	9,6
	6	1,25	0,18	62,8	6,54
120	0	1,54	0,00	66,8	13,3
	2	1,61	0,05	68,6	13,45
	4	1,69	0,09	63,1	11,94
	6	1,76	0,13	61,7	7,91

Як слідує з даних табл. 4.1, введення базальтової фібри позитивно впливає перш за все на міцність на розтяг при згині. Міцність $f_{c,tf}^7$ фібробетону контрольного складу при витраті сталевий фібри 80 кг/м³ становила 10,3 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону з базальтовою фіброю

становила 12,4 МПа (при витраті 4 кг/м³ та довжині волокон 12 мм). Середнє збільшення міцності на розтяг при згині в залежності від довжини волокна та його вмісту склало від 7 до 20%.

При витраті сталеві фібри 120 кг/м³ міцність $f_{c,ff}$ ⁷ фібробетону контрольного складу склала 13,3 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону з становила 14,9 МПа (при витраті базальтової фібри 4 кг/м³ та довжині волокон 12 мм). Таким чином, максимальне зростання міцності склало 12%. Менше зростання міцності в цьому випадку очевидно можна пояснити досягненням значень загального об'ємного вмісту волокон, що відповідають максимально можливому вмісту (т. D, рис. 3.12).

Використання базальтової фібри з довжиною волокон 24 мм в цілому показало гірші результати. Зафіксоване збільшення $f_{c,ff}$ ⁷ на 7% лише при вмісті цих волокон 2 кг/м³ (при витраті сталеві фібри 80 кг/м³). При збільшенні вмісту базальтової фібри зафіксоване максимальне падіння міцності на 40%.

Зменшення міцності фібробетону, що спостерігається при збільшенні довжини використовуваних волокон обумовлено, ймовірно, зменшенням процентного вмісту волокна в площині перетину руйнування і зниженням міцності зчеплення на границі «волокно - цементна матриця». Крім того волокна довжиною 24 мм гірше розподіляються в масиві фібробетону, що позначається в подальшому на особливостях його структури.

Аналіз характеру руйнування композиційного фібробетону, армованого базальтовими волокнами довжиною 12 мм, свідчить, що руйнування бетону відбувається з досить хорошою участю волокон в роботі цементної матриці.

Розглядаючи вплив частки базальтової фібри в загальному об'ємі армування (рис. 4.1) варто відзначити, що її оптимальний вміст складає 2 кг/м³ ($n = 0.07$) при витраті сталеві фібри 80 кг/м³ і 2..4 кг/м³ ($n = 0.05...0.09$) при витраті сталеві фібри 120 кг/м³. Подальше збільшення вмісту базальтової фібри очевидно приводить до збільшення питомої поверхні дисперсної арматури, що в свою чергу приводить до збільшення кількості води, необхідної для отримання бетонних сумішей із заданою рухомістю.

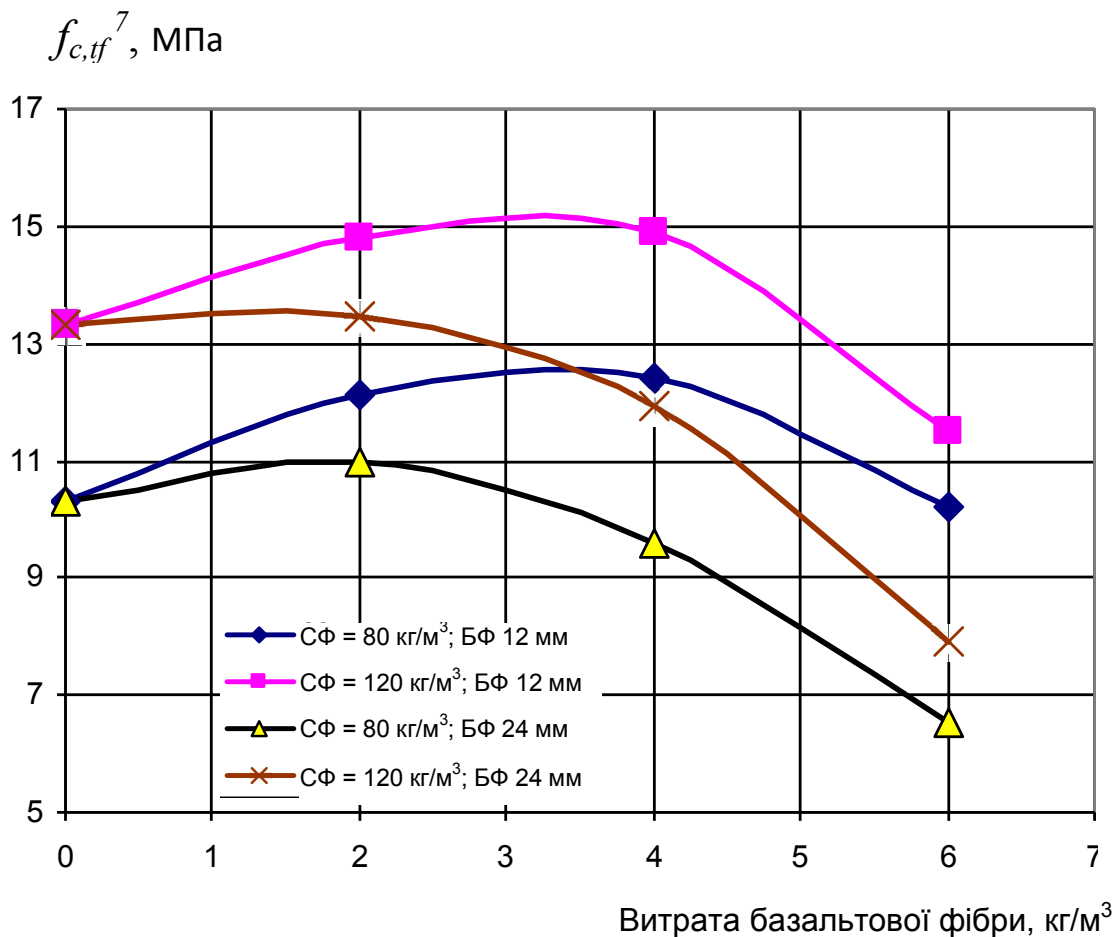


Рисунок 4.1 – Залежності міцності на розтяг при згині полідисперсно армованих фібробетонів

Міцність при стиску композиційних фібробетонів, очікувано мало залежить від вмісту базальтової фібри. Для різних композицій зафіксоване коливання значення міцності в середньому в межах 2...3 %.

Для порівняння результатів, одержаних при використанні базальтової фібри були проведені дослід з використанням поліпропіленової фібри, яка входить до групи низькомодульних волокон.

Як видно з результатів, наведених в табл. 4.2, при різних комбінацій витрат сталеві та поліпропіленової фібри в цілому спостерігається погіршення значень міцності на розтяг при згині у порівнянні із контрольними зразками. Лише при використанні поліпропіленової фібри довжиною 12 мм та її вмісті 1 кг/м³ зниження міцності $f_{c,tf}^7$ композиційного фібробетону майже не спостерігалось. В

усіх інших випадках введення до складу композиції поліпропіленової фібри погіршувало значення міцності на розтяг при згині в середньому від 5 до 40%.

Міцність при стиску практично не змінювалась при різних варіантах композицій у досліджуваних межах.

Таблиця 4.2 – Міцність фібробетонних зразків з різним вмістом та співвідношенням сталевोї та поліпропіленової фібри

Витрата сталевої фібри, кг/м ³	Витрата поліпропіленової фібри, кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка поліпропіленової фібри в загальному об'ємі армування n	Міцність при стиску у віці 7 діб f_{cm}^7 , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,t}^7$, МПа
Поліпропіленова фібра ($l = 12$ мм)					
80	0	1,03	0,00	64,5	10,3
	1	1,14	0,10	64,2	10,1
	2	1,25	0,18	64,6	9,4
120	0	1,54	0,00	66,8	13,3
	1	1,65	0,07	67,2	12,7
	2	1,76	0,13	67,3	12,1
Поліпропіленова фібра ($l = 18$ мм)					
80	0	1,03	0,00	64,5	10,3
	1	1,14	0,03	63,2	9,8
	2	1,25	0,06	62,9	8,6
120	0	1,54	0,00	66,8	13,3
	1	1,65	0,07	65,3	10,6
	2	1,76	0,13	65,9	7,8

Аналізуючи отримані результати, наведені в табл. 5.1-5.2 можна зробити висновок, що використання в якості компонента композиційного армування поліпропіленової фібри дає дещо гірший ефект у порівнянні з базальтовими волокнами. Це в першу чергу можна пов'язати із гіршим розподіленням в структурі бетону поліпропіленових волокон, що не сприяє рівномірному розподіленню сталевих волокон. Дослідження структури зруйнованих зразків фібробетонів з використанням поліпропіленової фібри вказувало на ознаки

неоднорідності структури, в окремих зонах спостерігались комки волокон, такі суміші при приготуванні та формуванні були більше схильні до розшарування. Також огляд характеру руйнування зразків композиційного фібробетону із поліпропіленовою фіброю вказував на гіршу адгезію поліпропілену з цементною матрицею, внаслідок чого при руйнуванні зразків спостерігалось висмикування окремих волокон.

Всі вказані вище недоліки були практично відсутні у випадку використання базальтової фібри для композиційного дисперсного армування. Очевидно, що базальтова фібра, яка за густиною та пружними характеристиками ближча до бетонної матриці ніж поліпропіленова, при оптимальній витраті та співвідношенні із сталеву фіброю утворює своєрідний несучий каркас, який утримує сталеву фібру, попереджає розшарування суміші та сприяє рівномірному розподіленню дисперсної арматури в структурі бетону. Все це, відповідно, позначається на міцнісних характеристиках фібробетонів.

4.2. Дослідження впливу факторів складу на міцність дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням

Попередні дослідження підтверджують гіпотезу про можливість покращення структури і, відповідно, властивостей фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням при використанні базальтової фібри.

З метою детального вивчення цього питання на наступному етапі досліджували комплексний вплив на міцнісні характеристики дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням витрати цементу, водоцементного відношення а також вмісту та об'ємного співвідношення сталеву та базальтової фібри. Для цього був реалізований трьохрівневий чотирьохфакторний план експерименту B_4 [105].

В якості сировинних матеріалів використовували портландцемент ПЦ-І М500 ПАТ «Волинь-цемент», заповнювач фракційної суміші – 0,16...2 мм (кварцовий пісок з $M_{кр}=2,1$) та 2...5 мм (гранітний щебінь) у співвідношенні

0,45:0,55. Необхідна рухомість суміші ($OK = 13...15$ см) досягалася за рахунок введення добавки суперпластифікатора Melflux 2651f. Використовували сталеву хвилясту фібру $\Phi 1$ та базальтову фібру довжиною 12 мм.

Умови планування експерименту та результати досліджень наведені в табл. 4.3 та табл. 4.4 відповідно.

Таблиця 4.3 – Умови планування експерименту при визначенні параметрів складів фібробетону з композиційним дисперсним армуванням

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X_1	Витрата цементу, кг/м^3 (Ц)	450	500	550	50
2	X_2	В/Ц	0,3	0,35	0,4	0,05
3	X_3	Витрата сталевих фібри, кг/м^3 (СФ)	80	100	120	20
4	X_4	Витрата базальтової фібри, кг/м^3 (БФ)	0	2	4	2

Після проведення обробки та статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі міцності дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням на стиск та розтяг при згині у вигляді поліноміальних рівнянь регресії. Результати обробки та статистичного аналізу експериментальних даних наведені в табл. 4.5.

Використовуючи моделі, наведені в табл. 4.5 були побудовані графічні залежності та поверхні відгуку вихідних параметрів від двох факторів впливу (рис. 4.2-4.3). При цьому два інших фактори, не представлені на кожному з графіків, були зафіксовані на нульовому рівні.

Аналізуючи отримані експериментально-статистичні моделі міцності при стиску, можна відзначити, що очікувано найбільш суттєвим фактором, який на неї впливає є водоцементне відношення (x_2), зменшення якого від +1 до -1 (від $V/C=0,4$ до $V/C=0,3$) призводить до збільшення міцності в середньому на 40%. Причому таке збільшення спостерігається при різних витратах цементу і у різні строки випробувань. Вплив даного фактору в обраному діапазоні його

Таблиця 4.4 – Експериментальні результати по визначенню параметрів складів фібробетону з композиційним дисперсним армуванням

№ т. плану	Кодовані значення факторів				Витрати компонентів, кг/м ³						В/Ц	СП, %	f_{cm}^1 , МПа	$f_{c,tf}^1$, МПа	f_{cm}^7 , МПа	$f_{c,tf}^7$, МПа	f_{cm}^{28} , МПа	$f_{c,tf}^{28}$, МПа
	X_1	X_2	X_3	X_4	Ц	П	Щ _{2...5}	В	СФ	БФ								
1	+	+	+	+	550	732	895	220	120	4	0,4	0,25	27,4	7,1	55,2	14,2	64,9	16,7
2	+	+	+	-	550	732	895	220	120	0	0,4	0,20	28,6	6,2	54,7	11,1	67,2	13,8
3	+	+	-	+	550	732	895	220	80	4	0,4	0,13	30,2	6,3	57,1	12,4	67,3	12,1
4	+	+	-	-	550	732	895	220	80	0	0,4	0,05	28,2	5,0	55,8	10,0	66,6	9,0
5	+	-	+	+	550	799	977	165	120	4	0,3	1,18	40,5	9,4	76,9	17,9	95,9	20,9
6	+	-	+	-	550	799	977	165	120	0	0,3	1,10	40,9	8,8	78,1	15,9	96,0	19,9
7	+	-	-	+	550	799	977	165	80	4	0,3	0,87	41,6	8,9	80,3	18,3	96,4	17,8
8	+	-	-	-	550	799	977	165	80	0	0,3	0,80	40,3	7,7	79,7	15,5	95,2	15,2
9	-	+	+	+	450	820	1002	180	120	4	0,4	0,44	24,1	7,2	49,2	15,2	55,9	16,2
10	-	+	+	-	450	820	1002	180	120	0	0,4	0,40	23,8	6,6	49,1	13,9	57,3	14,9
11	-	+	-	+	450	820	1002	180	80	4	0,4	0,26	24,5	6,1	49,6	10,8	57,1	11,4
12	-	+	-	-	450	820	1002	180	80	0	0,4	0,20	23,0	5,2	48,0	8,2	56,9	9,5
13	-	-	+	+	450	875	1069	135	120	4	0,3	1,14	33,9	8,3	69,9	16,9	83,8	19,8
14	-	-	+	-	450	875	1069	135	120	0	0,3	1,05	34,1	7,5	71,0	15,2	83,9	17,0
15	-	-	-	+	450	875	1069	135	80	4	0,3	0,34	34,3	7,2	72,2	12,8	84,8	13,7
16	-	-	-	-	450	875	1069	135	80	0	0,3	1,00	33,8	6,3	70,4	10,3	83,3	11,8
17	+	0	0	0	550	766	936	193	100	2	0,35	0,48	32,3	8,3	67,1	16,9	79,9	19,2
18	-	0	0	0	450	847	1036	158	100	2	0,35	0,32	29,9	7,6	64,2	15,6	75,1	18,3
19	0	+	0	0	500	776	948	200	100	2	0,4	0,33	24,2	7,7	53,0	14,7	65,0	16,3
20	0	-	0	0	500	837	1023	150	100	2	0,3	0,56	39,5	8,8	77,9	17,4	92,9	20,1
21	0	0	+	0	500	806	986	175	120	2	0,35	0,34	31,7	7,5	68,1	14,2	77,2	16,4
22	0	0	-	0	500	806	986	175	80	2	0,35	0,13	32,3	6,8	62,3	11,5	78,5	12,1
23	0	0	0	+	500	806	986	175	100	4	0,35	0,27	32,0	8,7	65,2	15,7	76,4	18,9
24	0	0	0	-	500	806	986	175	100	0	0,35	0,20	31,6	7,5	66,0	14,6	78,1	17,1

Таблиця 4.5 – Математичні моделі міцнісних параметрів дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням

Вихідний параметр		Математичні моделі
Міцність при стиску у віці:	1 доба	$f_{cm}^1 = 31,7 + 2,7 \cdot X_1 - 5,8 \cdot X_2 - 0,2 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_4 - 0,6 \cdot X_1^2 + 0,1 \cdot X_2^2 + 0,3 \cdot X_3^2 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,3 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,4 \cdot X_3 \cdot X_4$
	7 діб	$f_{cm}^7 = 66,1 + 3,6 \cdot X_1 - 11,3 \cdot X_2 - 0,2 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_4 - 0,7 \cdot X_2^2 - 2,4 \cdot X_4^2 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,3 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,4 \cdot X_3 \cdot X_4$
	28 діб	$f_{cm}^{28} = 78,4 + 5 \cdot X_1 - 14,2 \cdot X_2 - 0,1 \cdot X_3 + 1 \cdot X_4 - 1 \cdot X_1^2 - 0,6 \cdot X_2^2 - 0,7 \cdot X_3^2 - 1,3 \cdot X_4^2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,2 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,35 \cdot X_2 \cdot X_3$
Міцність на розтяг при згині у віці:	1 доба	$f_{c,tf}^1 = 7,47 + 0,31 \cdot X_1 - 0,82 \cdot X_2 + 0,46 \cdot X_3 + 0,43 \cdot X_4 - 0,18 \cdot X_1^2 - 0,33 \cdot X_3^2 + 0,12 \cdot X_4^2 - 0,36 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,1 \cdot X_3 \cdot X_4$
	7 діб	$f_{c,tf}^7 = 15,56 + 0,74 \cdot X_1 - 1,66 \cdot X_2 + 1,38 \cdot X_3 + 1,1 \cdot X_4 + 0,67 \cdot X_1^2 + 0,47 \cdot X_2^2 - 1,43 \cdot X_3^2 - 0,43 \cdot X_4^2 - 0,8 \cdot X_1 \cdot X_2 - X_1 \cdot X_3 + 0,14 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,25 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,14 \cdot X_3 \cdot X_4$
	28 діб	$f_{c,tf}^{28} = 17,85 + 0,66 \cdot X_1 - 2,03 \cdot X_2 + 2,32 \cdot X_3 + X_4 + 0,88 \cdot X_1^2 + 0,33 \cdot X_2^2 - 1,62 \cdot X_3^2 - 0,57 \cdot X_4^2 - 0,75 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,18 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,19 \cdot X_3 \cdot X_4$
Витрата Melflux 2651F		$СП = 0,41 + 0,095 \cdot X_1 - 0,33 \cdot X_2 + 0,12 \cdot X_3 + 0,11 \cdot X_4 - 0,06 \cdot X_1^2 + 0,2 \cdot X_2^2 - 0,03 \cdot X_3^2 - 0,02 \cdot X_4^2 - 0,07 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,02 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,04 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,05 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,04 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,04 \cdot X_3 \cdot X_4$

варіювання носить лінійний характер (рис. 4.2) і він складає близько 70% від впливу усіх факторів. Збільшення витрати цементу (x_1) у варійованих межах збільшує міцність при стиску на 8...20%. Зміна вмісту сталеві фібри (x_3) при постійному водоцементному відношенні суттєво не впливає на міцність досліджуваних бетонів. В той же час, базальтова фібри (x_4) дозволяє дещо підвищити міцність фібробетону, особливо у віці 28 діб (рис. 4.3). На це вказують також і значення лінійних коефіцієнтів у рівняннях регресії (-0,1 для x_3 і 1,0 для x_4). Таку відмінність у впливі на міцність фібробетону сталеві і базальтової фібри можна пояснити більшою питомою поверхнею останньої та кращим її зчепленням із бетонною матрицею.

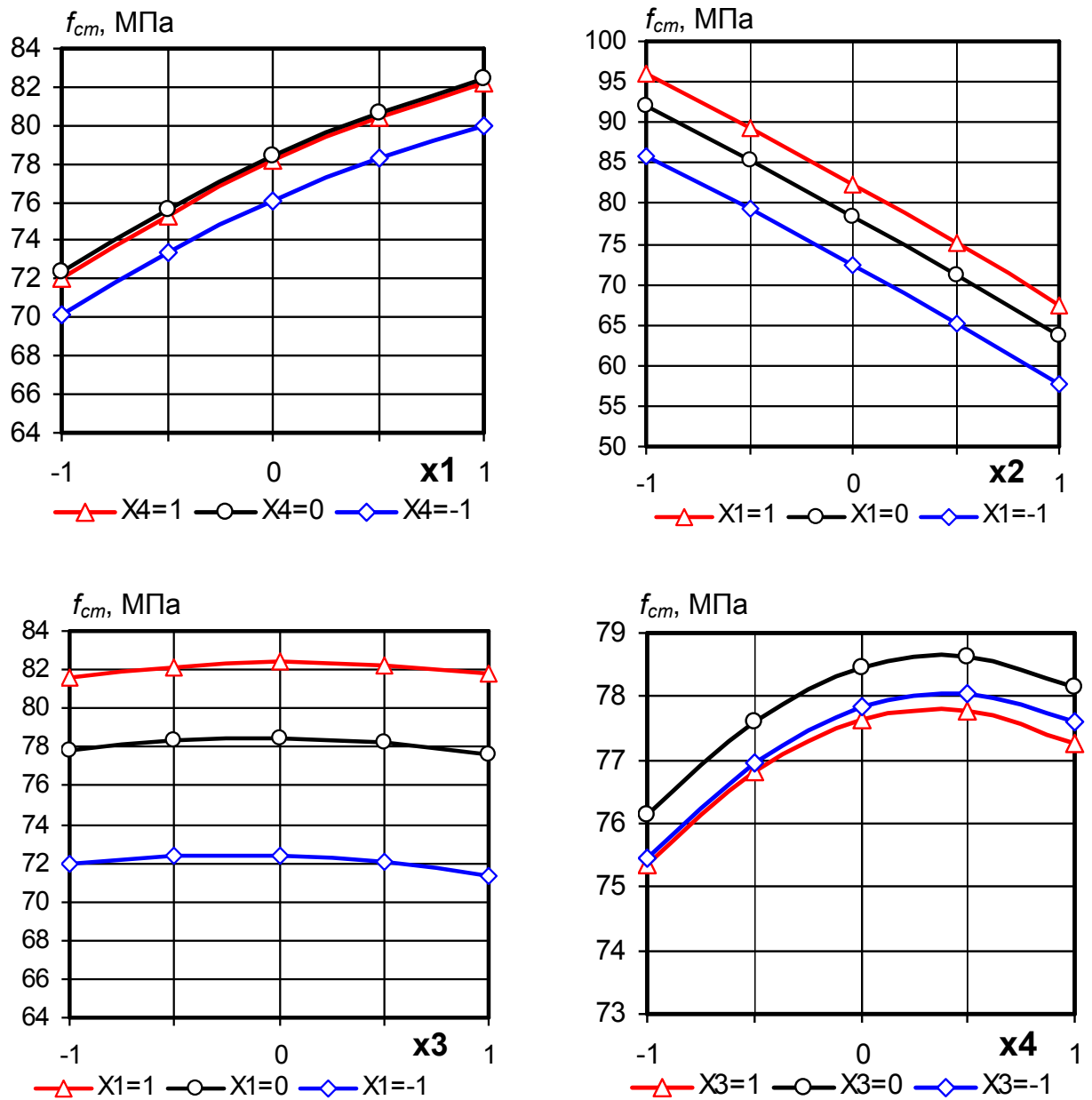


Рисунок – 4.2. Залежність міцності при стиску фібробетону з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 діб від витрати цементу (X_1), В/Ц (X_2) та витрат сталеві фібри (X_3) та базальтової фібри (X_4)

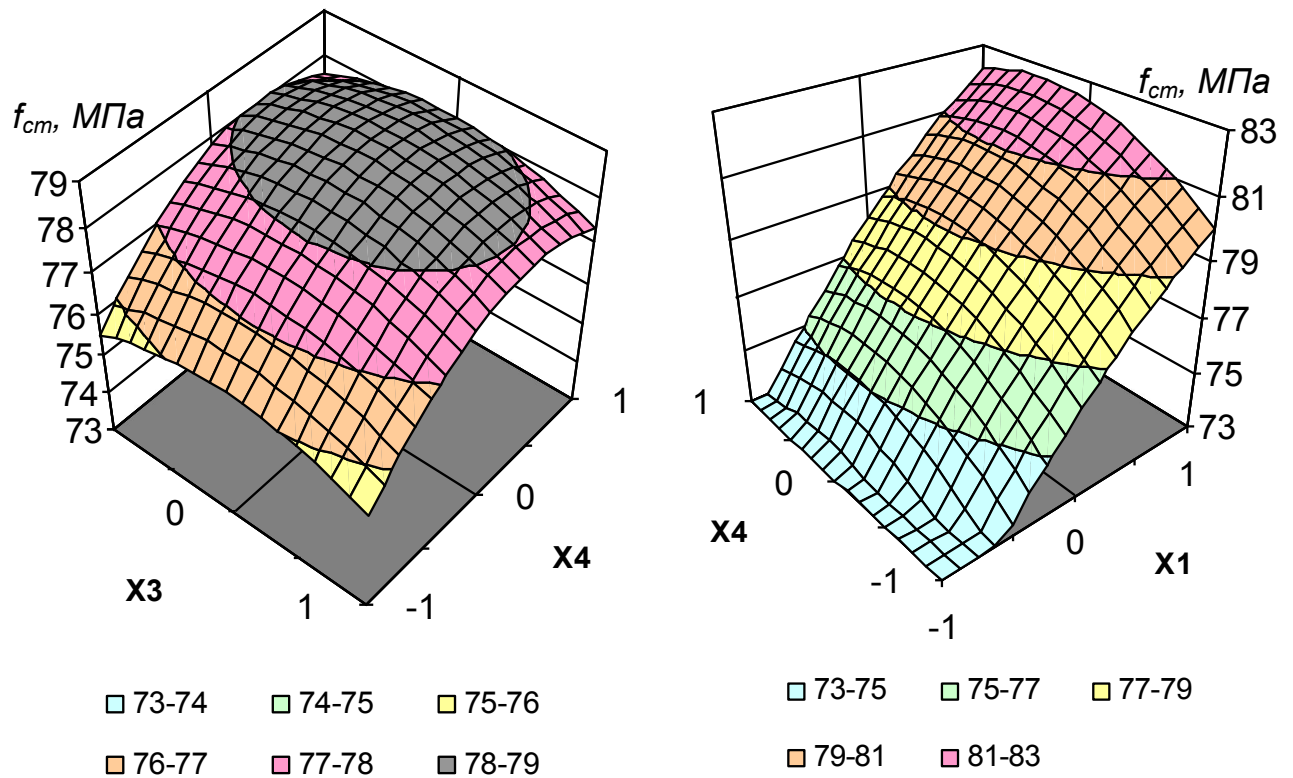


Рисунок 4.3 – Поверхні відгуку міцності при стиску фібробетону з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 діб від витрати цементу (X_1) та витрат сталеві фібри (X_3) та базальтової фібри (X_4)

За своїм впливом на міцність при стиску дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням досліджувані фактори можна розташувати в ряду: $x_2 > x_1 > x_4 > x_3$.

Характер залежностей міцності на розтяг при згині, що побудовані на основі відповідних моделей (табл. 4.4) суттєво відрізняється. Варто відзначити, що фактор вмісту сталеві фібру (x_3), який відображає ступінь дисперсного армування фібробетону є одним з найбільш впливових на величину даного показника міцності. Причому максимальний вплив даного фактору проявляється у віці 28 діб (38% від впливу усіх факторів). Другим за ступенем впливу на міцність на розтяг при згині є фактор В/Ц (33%), а його вплив у ранньому віці навіть переважає вплив фактора вмісту сталеві фібри (рис. 4.4).

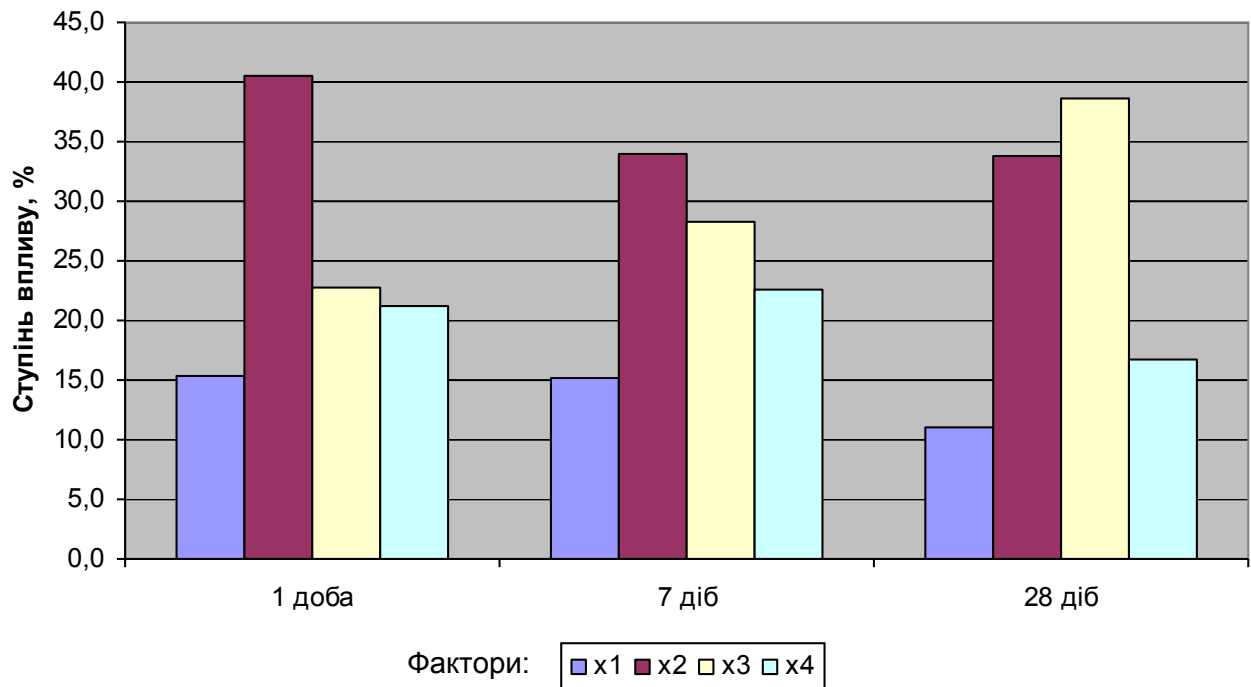


Рисунок 4.4 – Ступінь впливу факторів на міцність на розтяг при згині у різному віці

Вплив фактору вмісту сталеві фібри (x_3) носить слабо виражений екстремальний характер, що видно як із відповідної графічної залежності (рис. 4.5), так і по квадратичному коефіцієнту у відповідному рівнянні регресії (табл. 4.5). Збільшення вмісту фібри від 80 ($x_3=-1$) до 110 ($x_3=0,5$) кг/м³ призводить до збільшення міцності на розтяг при згині в середньому на 30...40 % залежно від значень інших факторів. Подальше ж збільшення кількості сталеві фібри суттєво не впливає на міцність дрібнозернистого фібробетону на розтяг при згині. Найменшим впливом на розглядуваний показник при постійному В/Ц відзначається фактор витрати цементу (x_1), що має найменший лінійний коефіцієнт у рівнянні регресії. Порівняно високий коефіцієнт взаємодії факторів x_1 та x_2 вказує на суттєву залежність ступеня впливу кожного з них від зміни іншого і приводить до появи неоднозначних кривих на графіку (рис. 4.5).

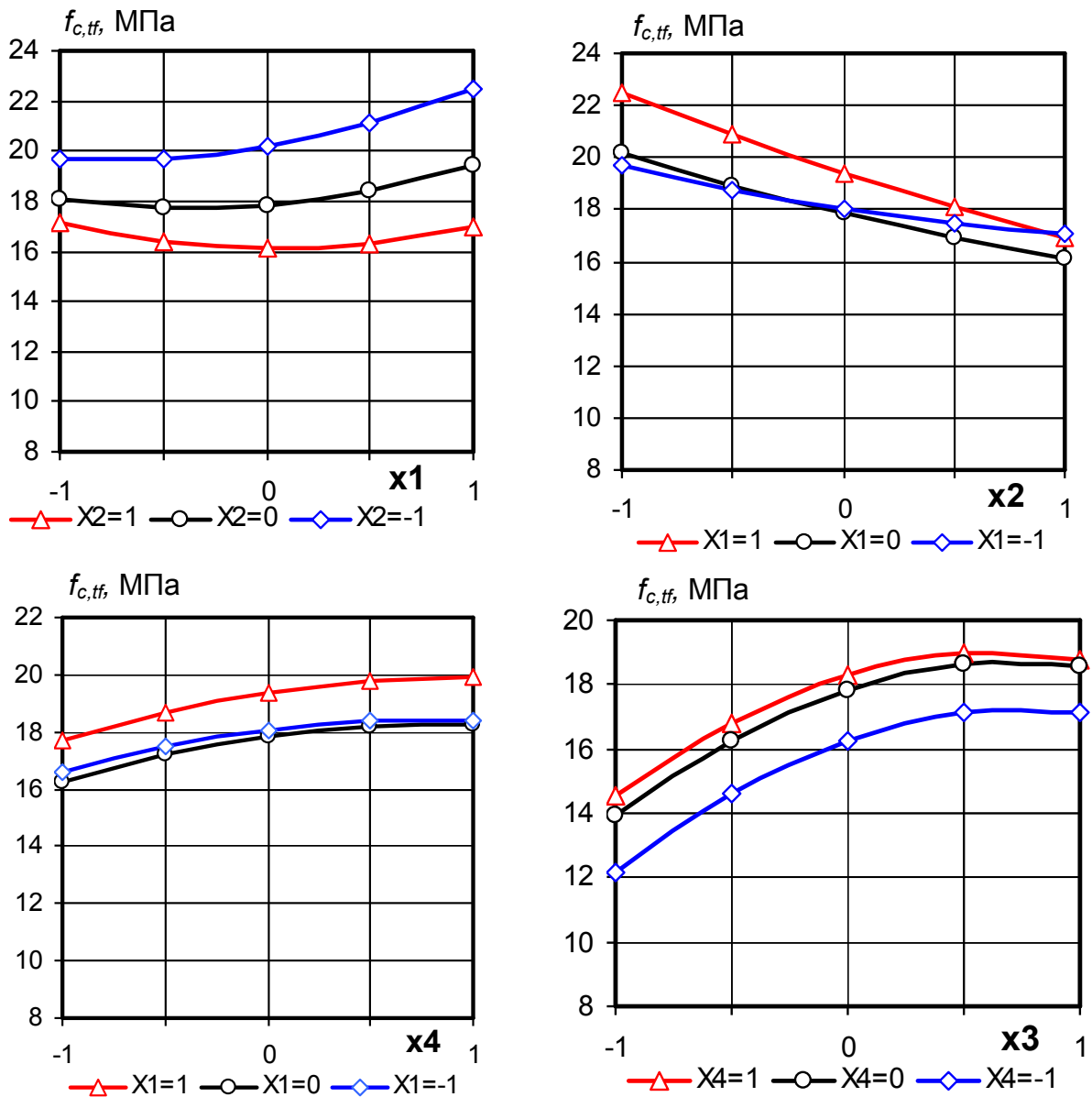


Рисунок 4.5 – Залежності міцності на розтяг при згині фібробетону з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 діб від витрати цементу (X_1), В/Ц (X_2) та витрат сталеві фібри (X_3) та базальтової фібри (X_4)

Стосовно впливу вмісту базальтової фібри (x_4), як уже було зазначено раніше (п. 5.1) введення її до складу суміші в кількості до 4 кг/м^3 дозволяє збільшити міцність на розтяг при згині до 20% у порівнянні зі складами без її вмісту. Також можна відзначити високу ступінь впливу даного фактора на величину міцності у ранні строки твердіння, яка у віці 1 доба складає понад 20% (рис. 4.4) і майже не поступається за силою впливу фактору вмісту сталеві фібри (x_3). В подальшому спостерігається зменшення величини впливу фактора

x_4 і відповідного зростання x_3 . Аналіз поверхонь відгуку вихідного параметру $f_{c,tf}^{28}$ (рис. 4.6) вказує на те, що з метою досягнення максимальних значень міцності на розтяг при стиску необхідно підтримувати значення фактору В/Ц (x_2) на нижньому рівні варіювання, а факторів витрат сталеві (x_3) та базальтової фібри (x_4) на верхньому рівні. Також можна зробити висновок, що досягнення значень $f_{c,tf}^{28} > 18$ МПа можна забезпечувати в широкому діапазоні витрат сталеві та базальтової фібри ($x_3 = 0 \dots 1$; $x_4 = -0,5 \dots 1$) – відповідно $100 \dots 120$ кг/м³ сталеві та $1 \dots 4$ кг/м³ базальтової фібри.

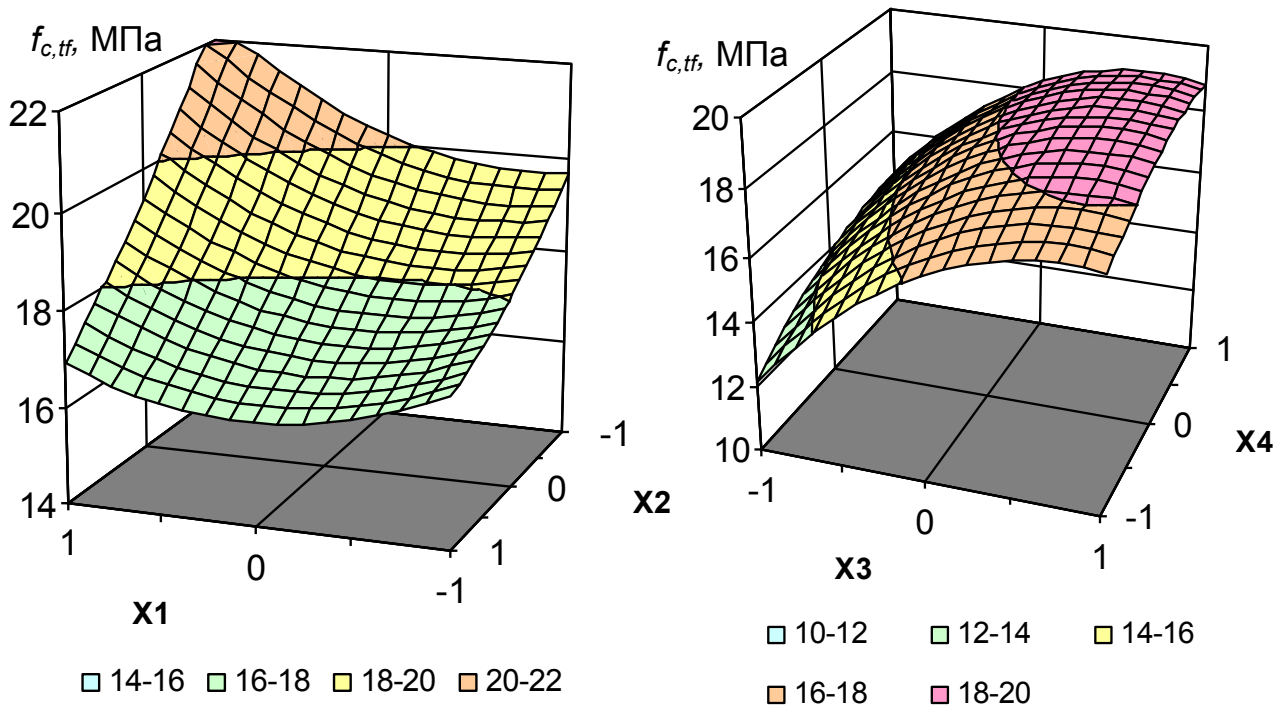


Рисунок 4.6 – Поверхні відгуку міцності на розтяг при згині фібробетону з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 днів від витрати цементу (X_1), В/Ц (X_2) та витрат сталеві фібри (X_3) та базальтової фібри (X_4)

Аналіз моделі витрати суперпластифікатора та графічних залежностей (рис. 4.7) дозволяє відзначити найбільший вплив фактора В/Ц (x_2). Значення його лінійного коефіцієнта у рівнянні регресії (табл. 4.5) суттєво перевищує значення коефіцієнтів для двох інших факторів. Збільшення витрати сталеві фібри (x_3) та базальтової фібри (x_4) у варійованих межах призводить до зростання витрати суперпластифікатора, що пояснюється потребою у забезпеченні необхідної легкоукладальності при потенційному збільшенні водопотреби. Зростання

витрати цементу в межах від 450 ($x_1 = -1$) до 500 $\text{кг}/\text{м}^3$ ($x_1 = 0$) тягне за собою необхідне збільшення витрати суперпластифікатора в 1,5...2 рази; в подальшому ($x_1 = 0 \dots +1$) ця залежність суттєво зменшується.

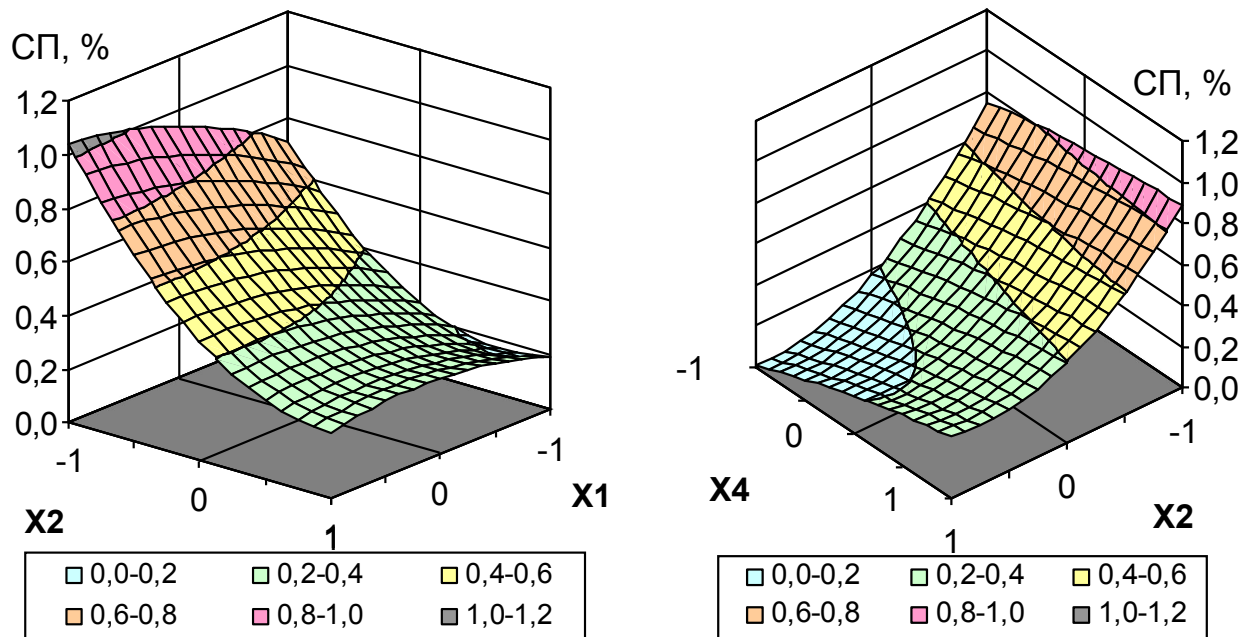


Рисунок 4.7 – Поверхні відгуку витрати суперпластифікатора для фібробетонної суміші з композиційним дисперсним армуванням від витрати цементу (X_1), В/Ц (X_2) та витрат базальтової фібри (X_4)

Потрібно відзначити, що незважаючи на деяке збільшення водопотреби бетонної суміші при введенні базальтової фібри, що необхідно компенсувати збільшеною витратою суперпластифікатора, інші показники як суміші, так і затверділого дрібнозернистого бетону покращуються.

За результатами попередніх досліджень було встановлено оптимальний вміст сталеві фібри, що складає близько $100 \text{ кг} / \text{м}^3$ ($\mu = 1,3\%$). Подальше збільшення вмісту фібри призводило до зниження міцності, що було наслідком проявлення схильності до розшарування навіть при невеликих навантаженнях. При використанні композиційного дисперсного армування з використанням базальтової фібри стає можливою витрата сталеві фібри в кількості $120 \text{ кг}/\text{м}^3$, при цьому забезпечується однорідність структури та практично відсутнє розшарування а міцнісні показники такого фібробетону збільшуються на 10...20%.

4.3. Технологічні властивості фібробетонних сумішей

Численні експериментальні та теоретичні роботи, що стосуються фібробетонів, спрямовані переважно на визначення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, в той час, як технологічні властивості фібробетонних сумішей розглядаються побіжно. Найчастіше відзначається вплив фактору легкоукладальності фібробетонної суміші [39, 78, 107, 127] та її зв'язок із пористістю [128]. Аналіз цих та інших робіт вказує на недостатність досліджень технологічних властивостей фібробетонних сумішей, зокрема таких, як водопотреба, розшаровуваність, збережуваність рухомості у часі тощо. Недостатньо розглянуто питання впливу на ці властивості пластифікуючих добавок, особливо суперпластифікаторів нового покоління.

Водопотреба і легкоукладальність. Водопотреба і легкоукладальність – найважливіші взаємопов'язані між собою технологічні властивості бетонних сумішей, що визначають як здатність їх до ущільнення, так і, значною мірою, властивості затверділого бетону.

У технології бетону відоме правило сталості водопотреби. Воно обумовлює, що при незмінному водовмісті витрата цементу в межах $200 \dots 400 \text{ кг/м}^3$ не впливає істотно на легкоукладальність бетонних сумішей. Відповідно до цього правила водопотреба бетонних сумішей, необхідна для досягнення заданого показника легкоукладальності, є практично постійною у визначеному діапазоні витрат цементу і відношенні Ц/В.

Встановлення верхньої межі області правила постійності водопотреби, що дозволяє враховувати особливості цементу, що застосовується, досягається при визначенні його через критичне Ц/В $((\text{Ц/В})_{\text{кр}})$, що рівне в середньому $1,68K_{\text{н.г}}$, де $K_{\text{н.г}}$ – Ц/В, що відповідає нормальній густоті цементного тіста [129]. Для бетонів звичайних класів $(\text{Ц/В})_{\text{кр}}$ знаходиться в межах $2,2 \dots 2,4$.

Із фізичних позицій правило сталості водопотреби полягає в тому, що зі збільшенням Ц/В до деякого критичного значення ріст структурної в'язкості цементного тіста в бетонній суміші компенсується збільшенням його кількості і

відповідно товщини шару цементного тіста на зернах заповнювача. За межами критичного Ц/В збільшення кількості цементного "мастила" вже не компенсує прогресивно зростаючу водопотребу бетонної суміші.

Для встановлення впливу Ц/В на водопотребу високоміцних фібробетонів досліди проводили на дрібнозернистому бетоні із застосуванням в якості заповнювача фракційної суміші з кварцового піску (0,16...2 мм) та гранітного щебеню (2...5 мм).

Для дрібнозернистого сталеві фібробетону витрату фібри змінювали від 50 кг/м³ ($\mu = 0,64\%$) до 100 кг/м³ ($\mu = 1,28\%$). Для фібробетону з композиційним дисперсним армуванням витрата сталеві фібри хвилястого профілю приймалася рівною 100 кг/м³, а базальтової змінювалась від 2 до 4 кг/м³ (в першому випадку сумарна об'ємна витрата складала $\mu = 1,36\%$, $n = 0,059$, в другому – $\mu = 1,43\%$, $n = 0,118$). В бетонні суміші вводили суперпластифікатори нафталін-формальдегідного типу С-3 (Поліпласт СП-1) та полікарбоксилатного Melflux 2651f. Співвідношення піску і щебеню для звичайного важкого бетону розраховували згідно з відомими рекомендаціями [23].

На першому етапі бетонні суміші готували при чотирьох різних значеннях Ц/В. Рухомість сумішей витримували в межах 15 см.

Як свідчать представлені на рис. 4.8 результати дослідів, правило сталості водопотреби виконується і у випадку використання фібробетонних сумішей. Верхня межа області "критичного" Ц/В для таких сумішей знаходиться в межах 2,2...2,3. Також порівнюючи аналогічний склад суміші без фібри, можна відзначити, що введення фібри призводить до зростання водопотреби на 3...12% залежно від виду та вмісту дисперсної арматури. Суміші із композиційним дисперсним армуванням характеризуються більшою водопотребою порівняно із монодисперсноармованими сумішами і, тим більше, порівняно із дрібнозернистим бетоном, що пояснюється більшою сумарною поверхнею, яка потребує змочування, у першому випадку.

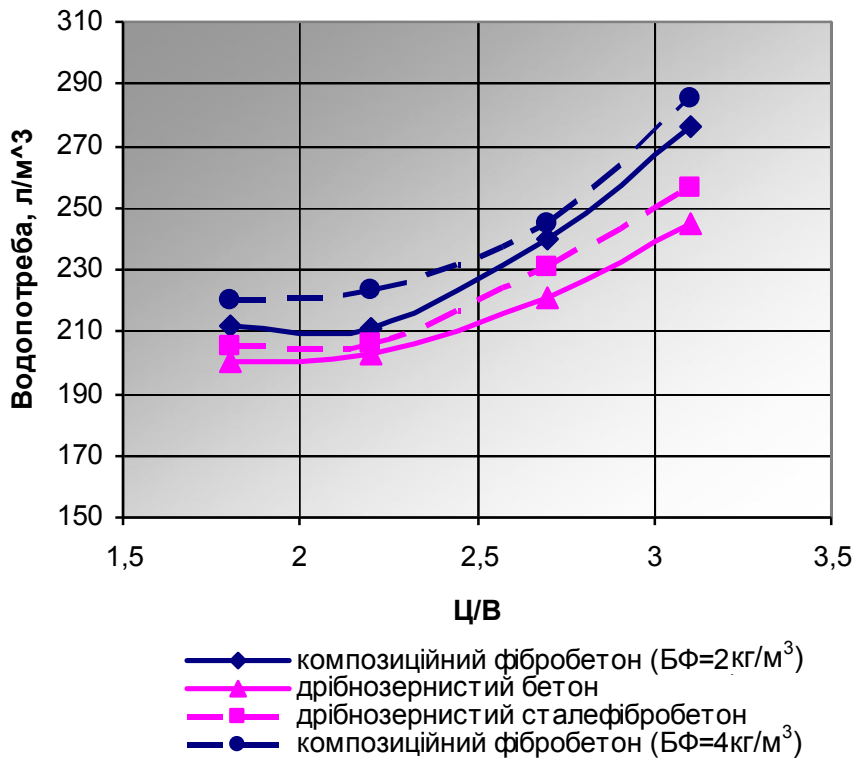


Рисунок 4.8 – Вплив Ц/В на водопотребу фібробетонних сумішей

Розглядаючи вплив вмісту фібри на водопотребу фібробетонних сумішей (рис. 4.9-4.10), можна відмітити закономірність росту водопотреби при зростанні її витрати.

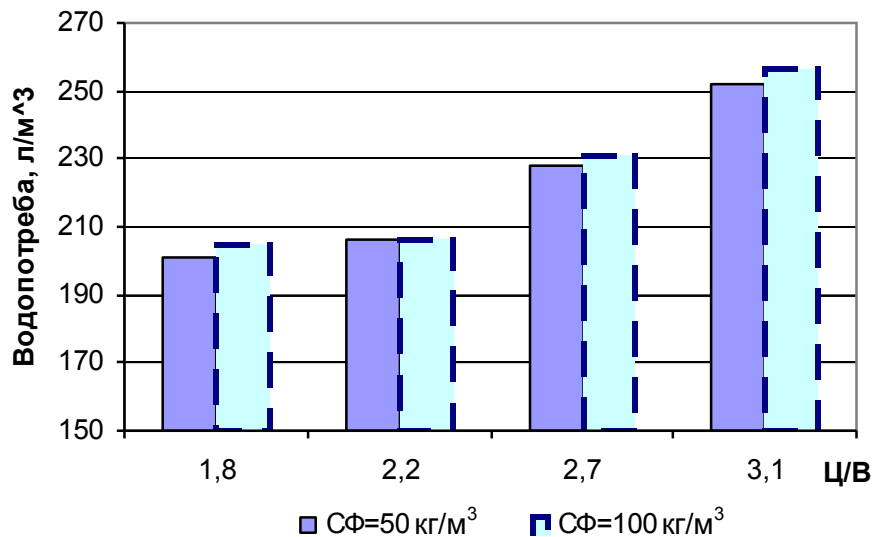


Рисунок 4.9 – Вплив вмісту сталеві фібри та Ц/В на водопотребу фібробетонних сумішей

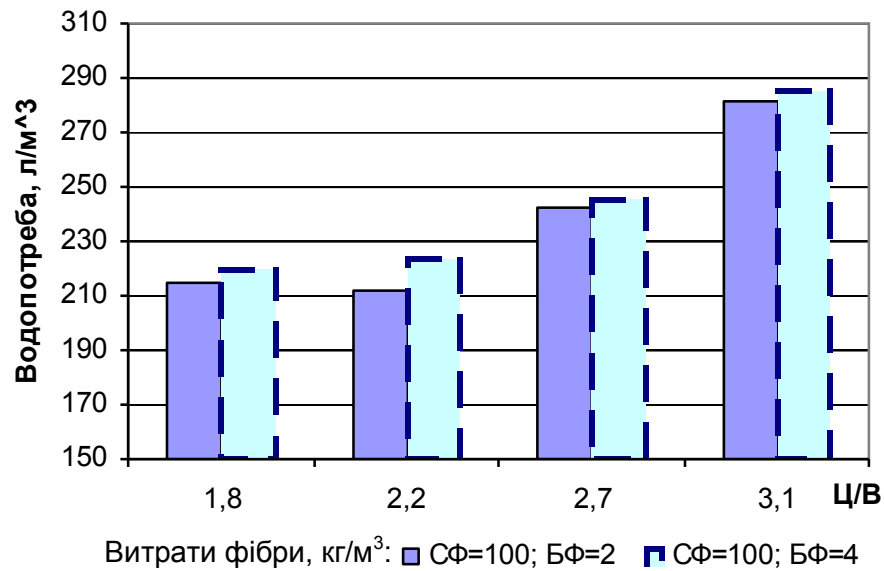


Рисунок 4.10 – Вплив вмісту сталевий та базальтової фібри та Ц/В на водопотребу фібробетонних сумішей з композиційним дисперсним армуванням

Збільшення вмісту базальтової фібри з 2 до 4 кг/м³ приводить до зростання водопотреби в середньому на 2...5%.

Використання пластифікуючих добавок Melflux 2651F та С-3 поряд із зниженням водопотреби зміщує "критичне" Ц/В до значень 2,6...2,7 (рис. 4.11).

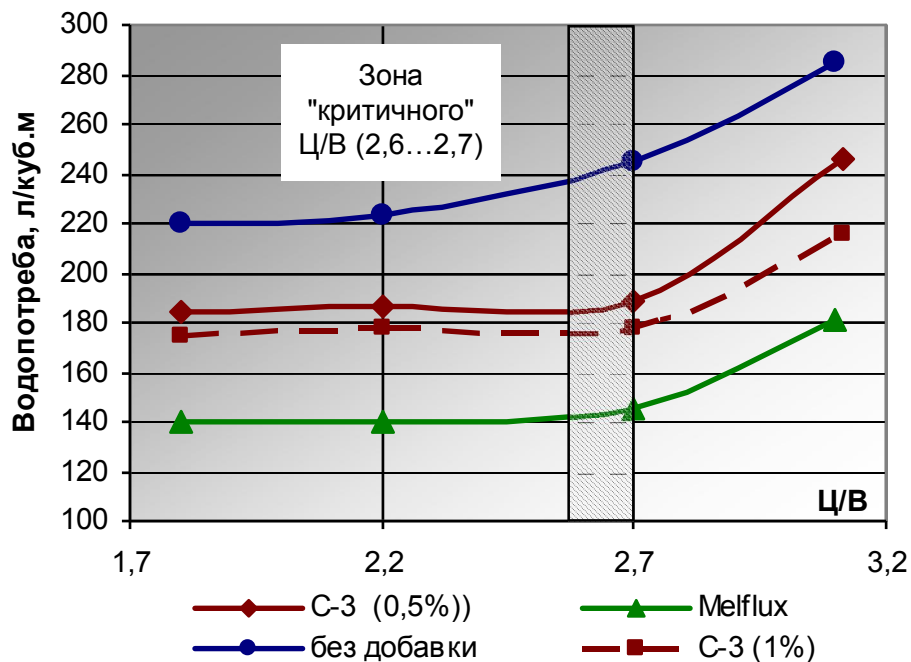


Рисунок 4.11 – Вплив Ц/В на водопотребу фібробетонних сумішей з композиційним дисперсним армуванням при використанні водоредукуючих добавок

У межах правила постійності водопотреби для досліджуваних бетонів встановлено залежності водовмісту від рухомості бетонної суміші (рис. 4.12). Витрата суперпластифікатора Melflux 2651F становила 0,5%, С-3 – 1%. Витрати фібри склали для сталевібробетону 100 кг/м^3 , для композиційного вібробетону – $100+2 \text{ кг/м}^3$.

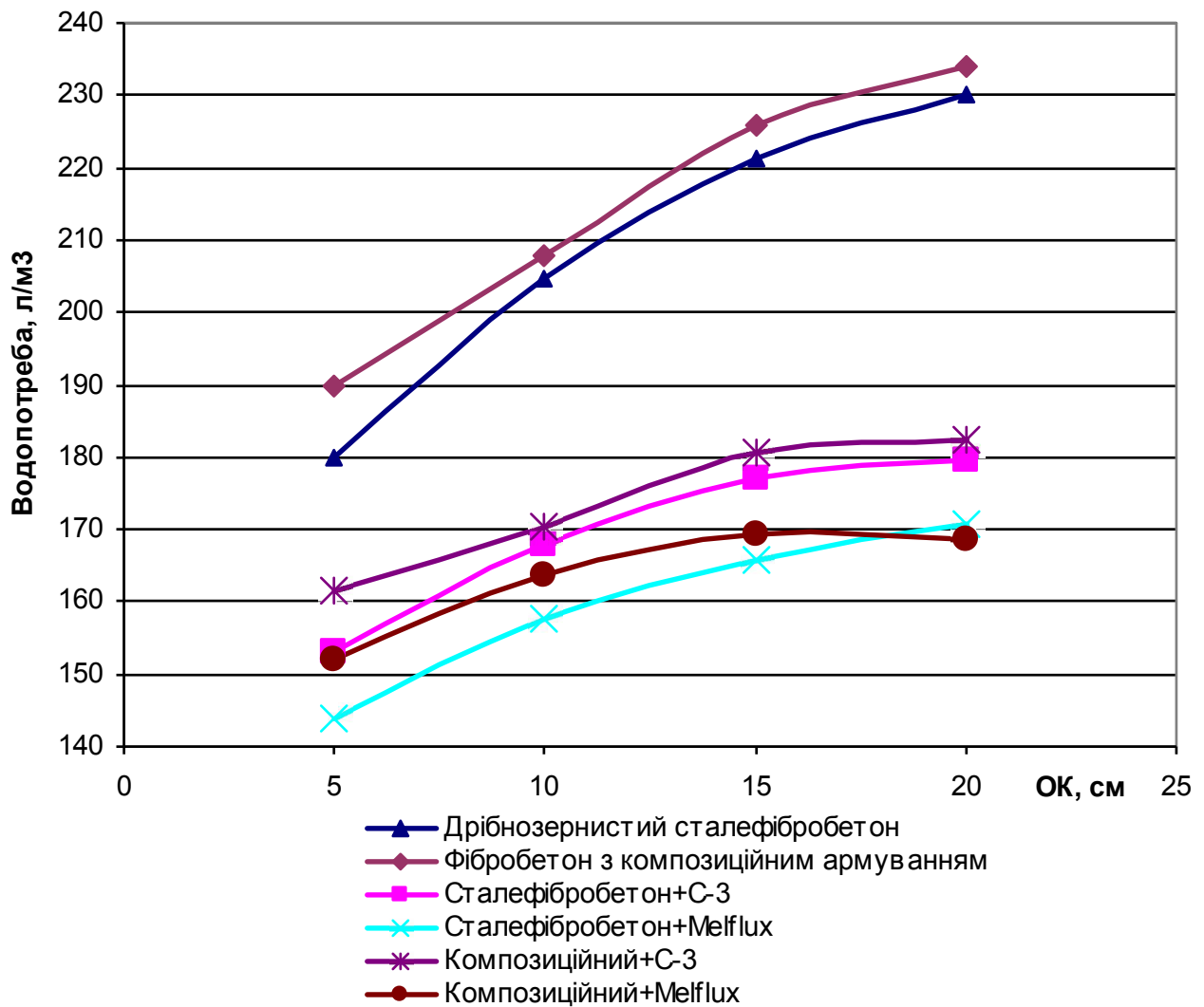


Рисунок 4.12 – Залежності впливу на водопотребу фібробетонних сумішей показників рухомості при використанні водоредукуючих добавок

Як видно з наведених даних, застосування добавок пластифікаторів призводить до того, що фібробетонні суміші (особливо композиційні) стають більш чутливими до зміни рухомості вже при невеликих змінах водовмісту.

Для визначення зміни водопотреби бетонних сумішей за межами правила сталості водопотреби збільшення водопотреби ΔB можна знаходити за емпіричною формулою [129]:

$$\Delta B = \left(B / Ц - \frac{1}{1,68 K_{н.г}} \right) \left(\frac{B_0}{100} \right)^{5.5}, \quad (4.1)$$

де B_0 – водопотреба, встановлена в межах дії правила постійності водопотреби; $K_{н.г.}$ – нормальна густина цементу.

У табл. 4.6 представлено значення водовмісту бетонних сумішей при $Ц/В > (Ц/В)_{кр}$ і різних показниках рухомості бетонної суміші, а також значення ΔB , обчислені за формулою (4.1) і знайдені експериментально. Водовміст фібробетонних сумішей знаходили за умови використання базового складу дрібнозернистого бетону, що встановлений раніше.

Таблиця 4.6 – Розрахункові та експериментальні значення поправки до водопотреби фібробетонних сумішей

ОК, см	B_0 , л при $(Ц/В)_{кр} \leq 2.2$	Поправка до водопотреби ΔB , л (за формулою 4.1) при		Поправка до водопотреби ΔB , л (експериментальна) при	
		$Ц/В = 2,7$	$Ц/В = 3,1$	$Ц/В = 2,7$	$Ц/В = 3,1$
Дрібнозернистий сталеві фібробетон					
5	185	14,6	26,4	15	27
10	205	25,7	46,4	24	42
15	218	36,0	65,1	32	61
20	225	42,9	77,5	43	75
Фібробетон з композиційним дисперсним армуванням					
5	192	17,9	32,4	16	31
10	210	29,3	53,0	26	50
15	225	42,9	77,5	43	76
20	238	58,4	105,5	56	103

Отримані результати показують хорошу збіжність за величинами поправок, як розрахованих за формулою (4.1), так і знайдених експериментально. Значення поправок, наведені в табл. 4.6, можна використовувати при проектуванні складів високоміцних фібробетонів, що потребують високих значень Ц/В.

Збережуваність рухомості фібробетонних сумішей у часі. Важливим питанням при дослідженні технологічних властивостей фібробетонних сумішей є прогнозування втрати рухомості – т.зв. "життєздатності", або збережуваності рухомості суміші в часі, що дозволяє вносити корективи при призначенні початкової легкоукладальності та визначати допустиму тривалість транспортування суміші.

Для високорухомих бетонних та фібробетонних сумішей за показник збережуваності рухомості можна прийняти час, за який середнє значення осадки конуса зменшиться від 20 до 15 см. Для порівняльної оцінки збережуваності рухомості сумішей в часі були проведені випробування фібробетонних сумішей, склади яких наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Склади фібробетонних сумішей

№	В/Ц	Витрата основних компонентів, кг/м ³				Фібра, кг/м ³	Вид та вміст пластифікатора, %
		Вода	Цемент	Пісок	Щебінь		
Дрібнозернистий сталеві фібробетон							
1	0.46	230	500	837	1023	–	–
2	0.48	238	500	837	1023	100	–
3	0.36	178	500	837	1023	100	С-3 (1%)
4	0.31	155	500	837	1023	100	Melflux (0,5%)
Фібробетон з композиційним дисперсним армуванням							
5	0.50	248	500	837	1023	100+2*	-
6	0.38	188	500	837	1023	100+2*	С-3 (1%)
7	0.32	161	500	837	1023	100+2*	Melflux (0,5%)

* Вказаний сумарний вміст сталеві та базальтової фібри.

На рис. 4.13 представлено збережуваність показників рухомості дрібнозернистих сталевібробетонних сумішей, вказаних в табл. 4.7 складів. Найбільші втрати рухомості в часі мають суміші з добавками суперпластифікаторів, найменші – без пластифікатора та використання фібри. Відомо, що рухливі пластифіковані суміші втрачають рухомість швидше, ніж рівнорухомі суміші без добавки суперпластифікатора, що закономірно пояснюється більшим водовмістом останніх.

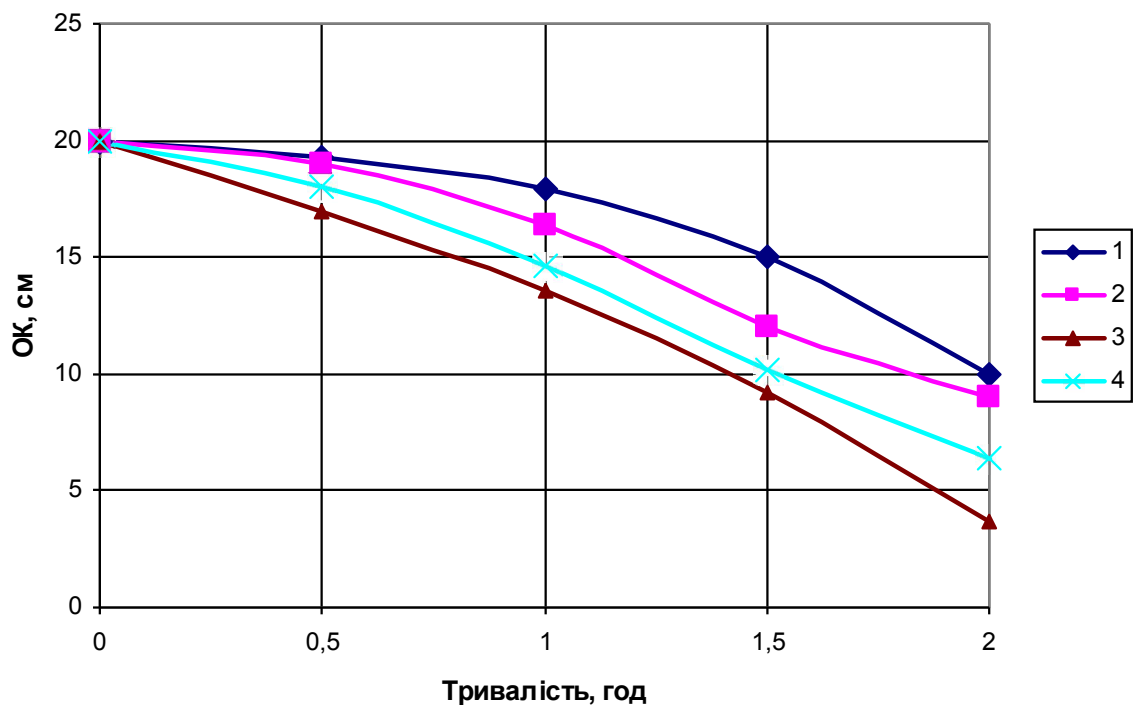


Рисунок 4.13 – Зміна рухомості сталевібробетонних сумішей за осадкою конуса (номера складів відповідають табл. 4.7)

Введення фібри приводить до деякого зменшення збережуваності рухомості суміші у часі у порівнянні із сумішшю без фібри. В цілому втрати рухомості протягом першої години для всіх складів є незначними. Збережуваність рухомості сумішей складів 1 - 4 становить відповідно 1,5 год., 1,35 год., 0,95 год. та 0,76 год.

Розглядаючи зміну рухомості у часі для вібробетону з композиційним дисперсним армуванням (рис. 4.14), можна відзначити наступні особливості. В цілому характер залежностей подібний до звичайного бетону, в той же час в абсолютних значеннях втрата рухомості є більш суттєвою. Очевидно, це можна

пояснити більшою зв'язаністю розчинової частини при наявності великої питомої поверхні дисперсної арматури.

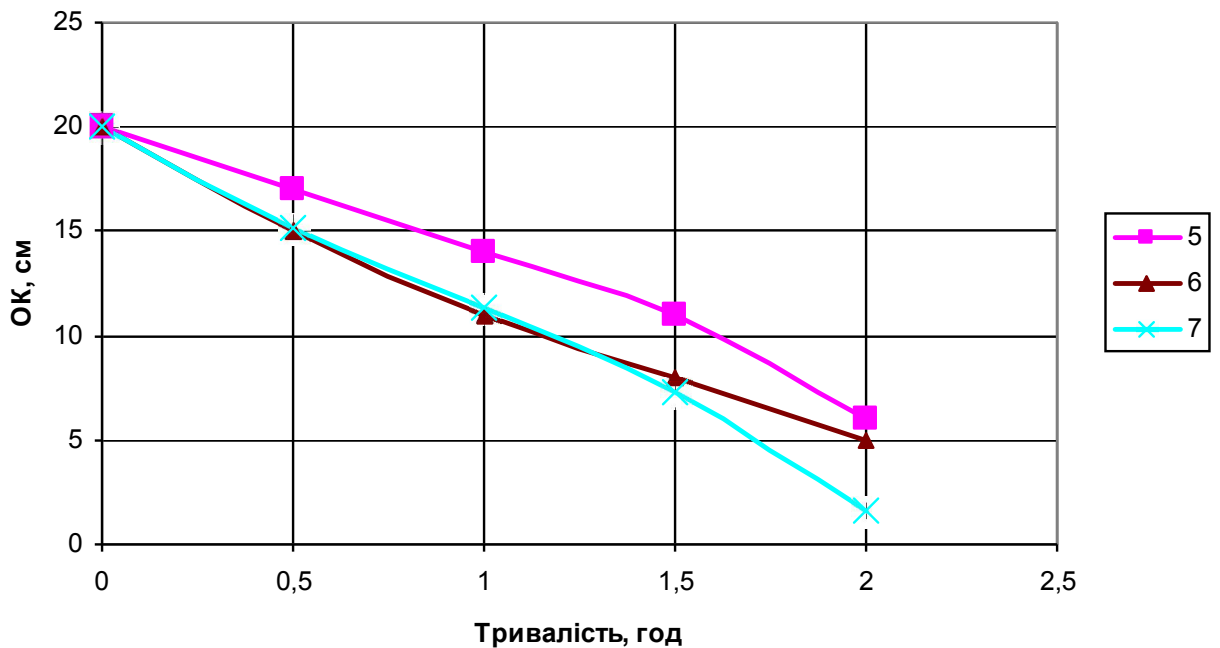


Рисунок 4.14 – Зміна рухомості фібробетонних сумішей з композиційним дисперсним армуванням за осадкою конуса (номера складів відповідають табл. 4.7)

Найбільші втрати рухомості в часі мають суміші з добавками суперпластифікаторів, причому кінетика зміни рухомості для складів сумішей з використанням обох суперпластифікаторів є практично однаковою до 1,5 год., найменші – без пластифікатора та використання фібри.

Втрати рухомості протягом першої години для всіх складів є більш суттєвими порівняно із сталеві фібробетонними сумішами. Збережуваність рухомості сумішей складів 5–7 становить відповідно 0,77 год., 0,51 год. та 0,49 год.

У процесі визначення збережуваності помічено характерну особливість сумішей, що включають у своєму складі пластифікатори. Збережуваність (життєздатність) таких сумішей можна суттєво збільшити, використовуючи додаткове постійне чи періодичне перемішування після їх приготування. На рис. 4.15 представлено порівняння зміни рухомості у часі фібробетонних сумішей

(склади 6–7, табл. 4.7) перемішаних одноразово та таких же сумішей, що піддавалися додатковому перемішуванню (2...2,5 хв) кожні 0,5 год.

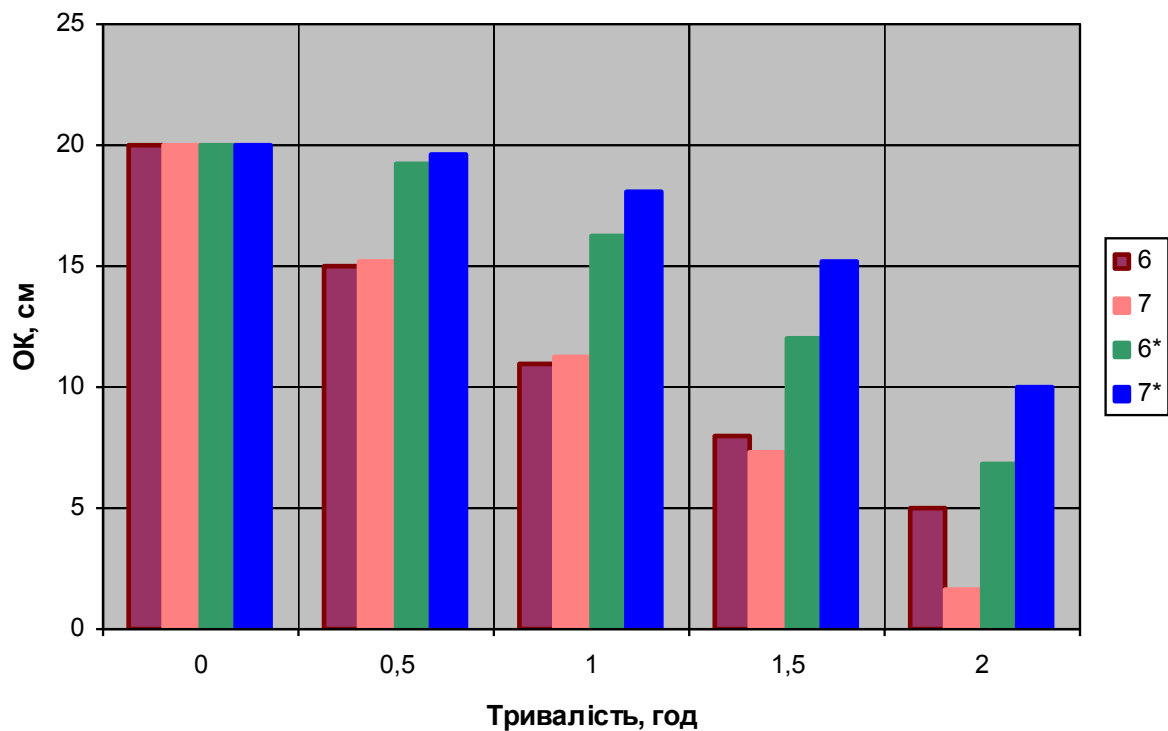


Рисунок 4.15 – Зміна рухомості дрібнозернистих фібробетонних сумішей при однократному та багаторазовому перемішуванні (номера складів відповідають табл. 4.7, * - при застосуванні додаткового перемішування)

Аналіз рис. 4.15 показує, що за умов додаткового перемішування життєздатність фібробетонних сумішей з використанням пластифікуючих добавок можливо суттєво подовжити. Особливо це стосується суміші з використанням добавки Melflux 2651f, для якої збережуваність (при зниженні рухомості на 5 см) склала 1,54 год., що в 3 рази перевищує значення для суміші, перемішаної однократно.

Для підвищення життєздатності композиційних фібробетонних сумішей доцільним є введення суперпластифікаторів після попереднього (2-хвилинного) перемішування бетонної суміші. Такий спосіб дозволяє одержати економію добавки порівняно зі складом при введенні її з водою замішування для одержання сумішей і бетонів з однаковими характеристиками.

Тривалість дії пластифікуючої добавки підвищується також при її порційному введенні в фібробетонну суміш. Ефективність порційного введення для одержання високорухомих сумішей можна пояснити з позиції необхідності підтримки в рідкій фазі цементу, що гідратується, деякої надлишкової кількості пластифікатора.

Розшаровуваність фібробетонних сумішей. Технологічні заходи, пов'язані з укладанням, ущільненням і обробленням армованих волокнами бетонних матеріалів, практично не відрізняються від традиційних. При виготовленні дисперсноармованих бетонів підвищену увагу необхідно приділяти тривалості вібрування. Час віброобробки спричиняє істотний вплив на рівномірність розподілу сталевих фібри по об'єму бетону. Перевищення часу вібрації бетонної суміші понад встановлений (залежно від його складу) може призвести до розшарування армованої суміші. В даному випадку, внаслідок різниці в значеннях середньої густини бетону і сталі, під дією сил гравітації сталеві фібри в процесі вібрації суміші прагне опуститися вниз (до піддону). Іноді ця властивість використовується для забезпечення зонного армування, коли за розрахунком у будь-якій частині (зоні) виробу потрібно більш високий рівень армування. Регулювання часу вібрації для забезпечення рівномірного або зонного армування здійснюється на стадії виготовлення виробів [39].

Для вивчення процесів розшарування фібробетонних сумішей, в т.ч. із композиційним дисперсним армуванням, були виконані експериментальні дослідження пов'язані із встановленням впливу вмісту сталевих та базальтових фібри та тривалості віброущільнення на розшарування фібробетонної суміші різної рухомості. Всі дослідження виконувалися на дрібнозернистому бетоні однакового складу, необхідна рухомість бетонної суміші забезпечувалась підбором вмісту суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f. Вміст сталевих фібри складав 80 та 120 кг/м³ бетонної суміші.

Рівномірність розподілення сталевих фібри по об'єму бетонної суміші оцінювалася за коефіцієнтом розшарування, який визначався за методикою

наведеною в СТО НОНСТРОЙ 2.27.125 – 2013 [130]. Дана методика полягає в наступному: в циліндричну форму висотою 200 мм та діаметром 100 мм вкладають фібробетонну суміш та піддають її віброущільненню. Після цього отриманий циліндр розрізають на дві рівні частини – верхню та нижню. З кожної із частин, за допомогою промивання, відділяють фібру та зважують її, а коефіцієнт розшарування визначають за формулою:

$$K_p = m_{\text{верх.f}} / m_{\text{нижн.f}} \quad (4.2)$$

На першому етапі вивчали розшаровуваність сталевібробетонних сумішей при різних значеннях рухомості. Результати експериментальних досліджень коефіцієнтів розшарування дрібнозернистих сталевібробетонів наведені в табл. 4.8 та на рис. 4.16.

Таблиця 4.8 – Вплив тривалості віброущільнення та рухомості бетонної суміші на коефіцієнт розшарування дрібнозернистого сталевібробетону

Вміст сталеві фібри, кг/м ³	Рухомість суміші (ОК), см	Коефіцієнт розшарування при тривалості віброущільнення, с			
		15	30	45	60
80	5-9	0,96	0,91	0,85	0,76
	10-15	0,88	0,82	0,71	0,61
	16-21	0,83	0,74	0,62	0,47
120	5-9	0,87	0,84	0,78	0,69
	10-15	0,77	0,74	0,67	0,48
	16-21	0,73	0,65	0,52	0,35

Отримані експериментальні результати свідчать про те, що найбільш суттєвими факторами, які впливають на коефіцієнт розшарування сталевібробетонної суміші є її рухомість, а також тривалість віброущільнення. Встановлено, що при збільшенні рухомості бетонної суміші необхідно суттєво обмежувати тривалість віброущільнення. Для забезпечення необхідного коефіцієнту розшарування, який у відповідності з [130] повинен складати не більше 0,8 для сумішей із маркою за легкоукладальністю РЗ і менше та 0,75 для

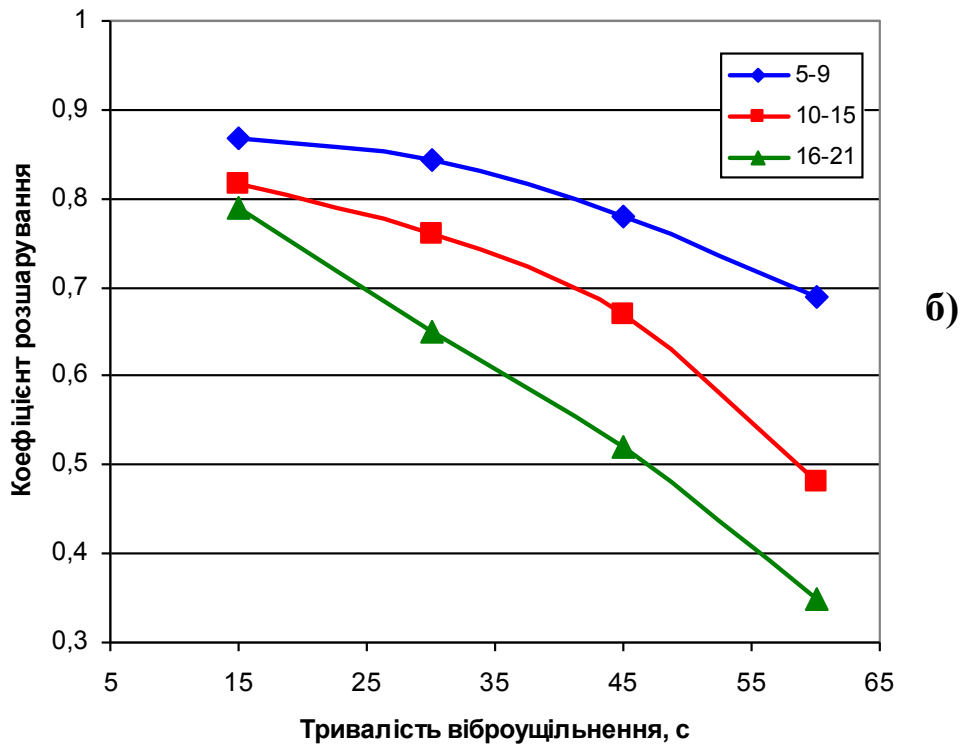
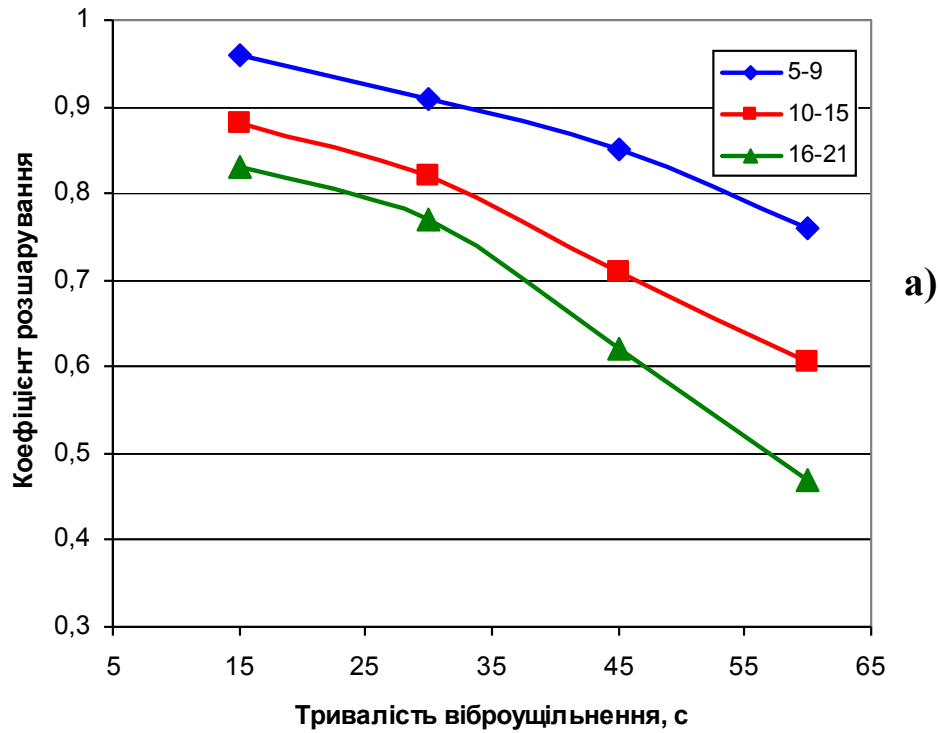


Рисунок 4.16 – Залежність коефіцієнту розшарування від тривалості віброущільнення дрібнозернистого сталевібробетону при різній рухомості бетонної суміші (ОК, см) при витраті сталевіброфібри 80 кг/м³ (а) та 120 кг/м³ (б)

марок за легкоукладальністю Р4 і Р5, оптимальна тривалість віброущільнення складає не більше 45 секунд для сумішей, що характеризуються рухомістю 5-9 см, 15-30 секунд для сумішей з рухомістю 10-15 см та не більше 15 секунд для сумішей з рухомістю 16-21 см. Також встановлено, що збільшення вмісту сталеві фібри у дослідженому діапазоні погіршує коефіцієнт розшарування дрібнозернистого сталеві фібробетону в середньому на 9% при ОК = 5-9 см, на 10...15% при ОК = 10-15 см і до 25% при ОК = 16-21 см. Як слідує з отриманих даних, досягнути значення коефіцієнта розшарування, що задовольняє нормативним вимогам, при витраті фібри 120 кг/м³ і рухомості суміші Р3 та Р4 стає взагалі неможливим.

На другому етапі визначали розшаровуваність фібробетонних сумішей з композиційним дисперсним армуванням при введенні базальтової фібри в кількості 2 кг/м³. Значення рухомості та тривалості віброущільнення приймали аналогічні до попереднього етапу. Результати експериментальних досліджень коефіцієнтів розшарування композиційних фібробетонних сумішей наведені в табл. 4.9 та на рис. 4.17.

Таблиця 4.9 – Вплив тривалості віброущільнення та рухомості бетонної суміші на коефіцієнт дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням

Вміст сталеві/ /базальтової фібри, кг/м ³	Рухомість суміші (ОК), см	Коефіцієнт розшарування при тривалості віброущільнення, с			
		15	30	45	60
80 / 2	5-9	0,96	0,93	0,89	0,79
	10-15	0,91	0,86	0,81	0,72
	16-21	0,88	0,81	0,74	0,54
120 / 2	5-9	0,93	0,9	0,81	0,71
	10-15	0,86	0,83	0,77	0,58
	16-21	0,83	0,74	0,62	0,47

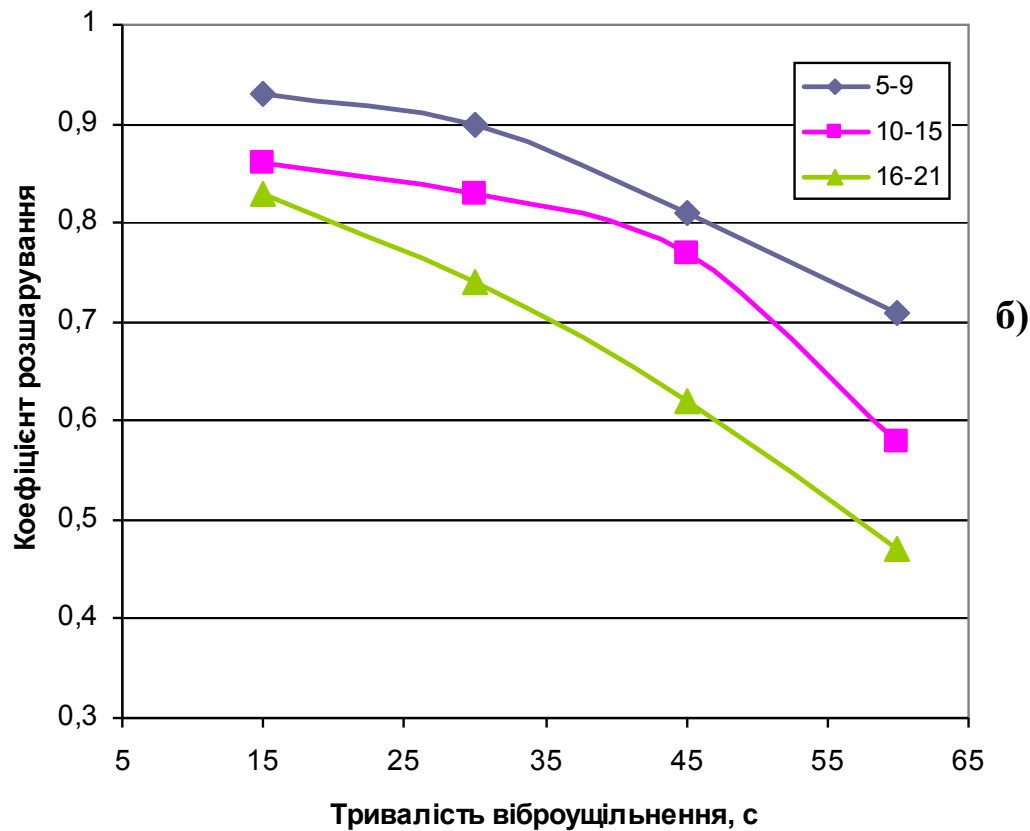
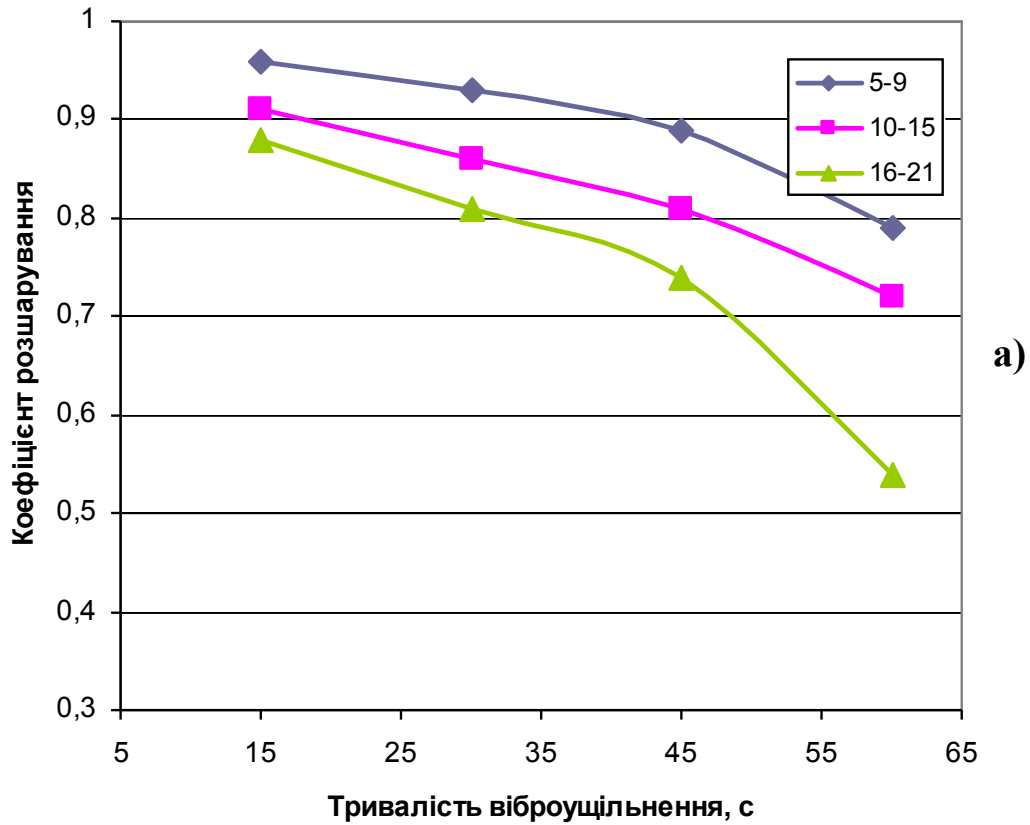


Рисунок 4.17 – Залежність коефіцієнту розшарування від тривалості віброущільнення дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням при різній рухомості бетонної суміші (ОК, см) та при витраті сталеві фібри 80 кг/м^3 (а) і 120 кг/м^3 (б)

Характер отриманих залежностей в цілому відповідає таким же залежностям, отриманим для сталевібробетону. В той же час абсолютні значення коефіцієнту розшарування для сумішей, що містять в собі базальтову фібру, є вищими практично для всіх комбінацій рухомості і тривалості віброущільнення.

Оптимальна тривалість віброущільнення з метою забезпечення нормативних значень коефіцієнту розшарування в даному випадку складає не більше 45 секунд для сумішей, що характеризуються рухомістю 5-9 см, 30-45 секунд для сумішей з рухомістю 10-15 см та 15-30 секунд для сумішей з рухомістю 16-21 см. Порівнюючи дані табл. 4.8 та 4.9 можна зробити висновок, що можлива тривалість віброущільнення для більшості сумішей з композиційним дисперсним армуванням зростає на 1-2 діапазони. Також, якщо для звичайного сталевібробетону при витраті сталевіброфібри 120 кг/м^3 було неможливим забезпечення нормативних значень коефіцієнту розшарування для сумішей з рухомістю P3 та P4, то для композиційного вібробетону це вдається навіть з деяким запасом.

Загалом використання композиційного дисперсного армування на противагу моноармуванню лише сталевіброфіброю дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт розшарування, що добре спостерігається на рис. 4.18. Якщо при рухомості суміші 5-9 см цей приріст складає 3...7% при обох витратах сталевіброфібри, то для більш рухомих сумішей позитивний вплив базальтовіброфібри проявляється більш яскраво і може досягати 20% для сумішей з рухомістю P3 і 35% з рухомістю P4.

Також варто відмітити, що перевага композиційного дисперсного армування проявляється сильніше в міру зростання тривалості віброущільнення та збільшення витрати сталевіброфібри.

Таким чином, виконані експериментальні дослідження підтверджують висловлену раніше гіпотезу про можливість уникнення або суттєвого зменшення розшарування вібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури вібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування. Використання базальтовіброфібри з довжиною волокон 12 мм у оптимальному співвідношенні із сталевіброю дозволяє суттєво підвищити значення коефіцієнта розшарування.

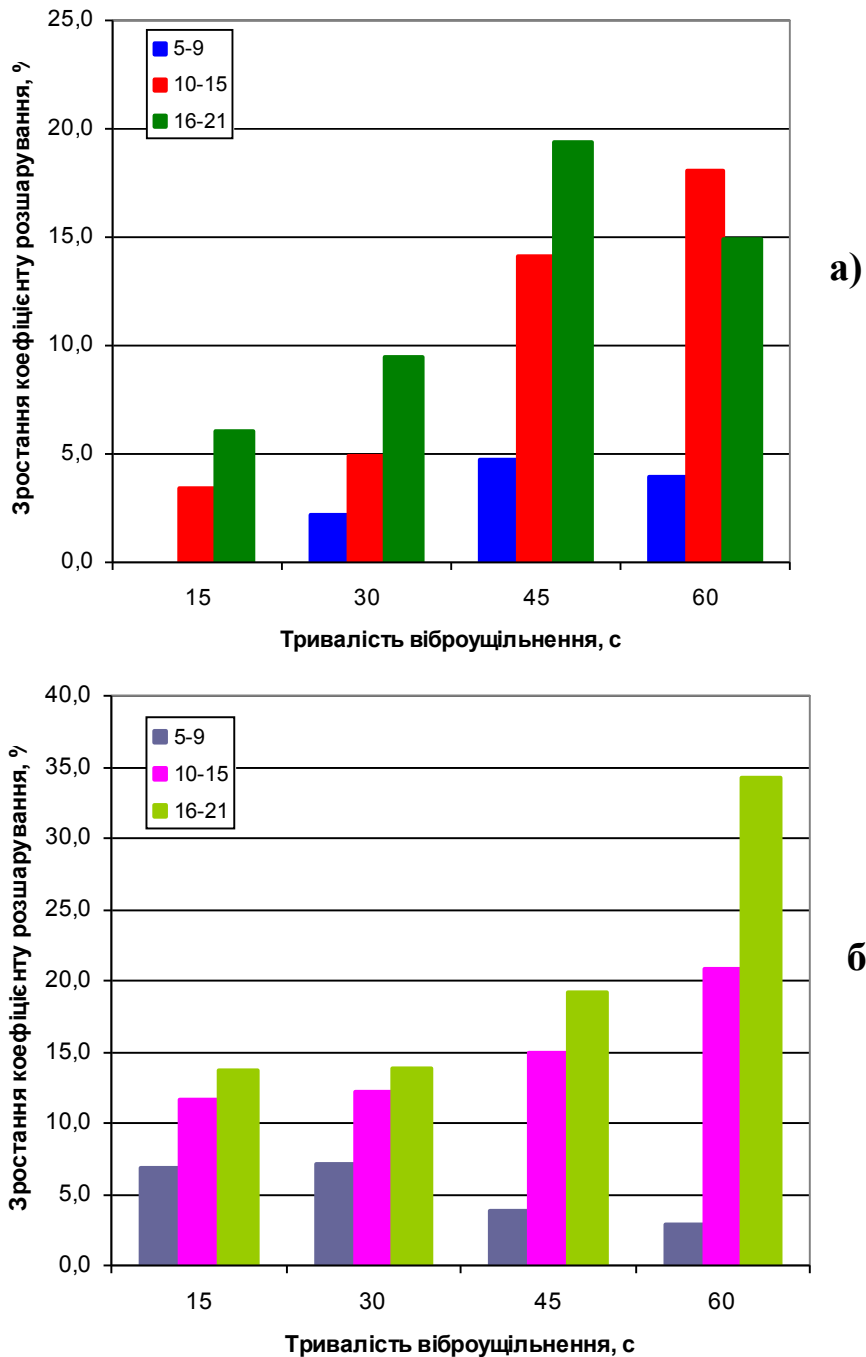


Рисунок 4.18 – Збільшення коефіцієнту розшарування при використанні композиційного дисперсного армування при витраті сталеві фібри 80 кг/м^3 (а) і 120 кг/м^3 (б)

Експериментально встановлені оптимальні тривалості віброущільнення дрібнозернистого сталеві фібробетону та фібробетону з композиційним дисперсним армуванням, дозволяють забезпечувати рівномірне розподілення сталеві фібри по об'єму фібробетону, що призводить до покращення фізико-механічних властивостей виробів і конструкцій, виготовлених на його основі.

Матеріали розділу 4 опубліковано автором у працях [131-133].

Висновки до розділу

1. Експериментально встановлено можливість одержання полідисперсно армованого фібробетону з використанням сталеві та базальтової фібри. При використанні базальтової фібри з довжиною волокон 12 мм в кількості 2...4 кг/м³ зафіксоване середнє зростання міцності на розтяг при згині 10...20% у порівнянні із складами фібробетонів що не містили неметалічну фібру. Використання базальтової фібри з довжиною волокон 24 мм показало дещо гірші результати, що обумовлено зменшенням процентного вмісту волокна в площині перетину руйнування а також гіршим розподіленням в масиві фібробетону.

2. При різних комбінаціях витрат сталеві та поліпропіленові фібри в цілому спостерігається погіршення значень міцності на розтяг при згині у порівнянні із контрольними зразками. Це в першу чергу можна пов'язати із гіршим розподіленням в структурі бетону поліпропіленових волокон, що не сприяє рівномірному розподіленню сталевих волокон, а також гіршою адгезією поліпропілену з цементною матрицею.

3. На основі аналізу комплексу експериментально-статистичних моделей міцнісних параметрів фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням встановлено ефективність застосування базальтової фібри довжиною волокон 12 мм в комплексі з хвилястою сталеві фіброю, в оптимальних співвідношеннях. Отримані кількісні залежності, що характеризують вплив водоцементного відношення, витрат цементу, вмісту сталеві та базальтової фібри на міцність композиційних фібробетонів при стиску та розтяг при згині а також їх співвідношення. Отримано залежність вмісту добавки суперпластифікатора Melflux 2651f від тих же факторів, що дозволяє отримувати у всіх випадках рівнорухомі фібробетонні суміші.

4. Експериментально встановлено, що для фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням, як і для звичайних бетонів, діє правило "постійності водопотреби", відповідно до якого при постійній рухомості бетонної суміші водопотреба залишається практично постійною при цементно-водних

відношеннях менших деякого критичного значення ($C/V < C/V_{кр}$). Зона критичного C/V для досліджуваних фібробетонів знаходиться в межах 2,2...2,3 а при введенні суперпластифікаторів зміщується до значень $C/V = 2,6...2,7$. Цей ефект можна пояснити суттєвим зменшенням нормальної густоти i , відповідно, водопотреби цементного тіста. Отримано експериментально-розрахункові залежності водопотреби фібробетонних сумішей, в т.ч. при використанні водоредукуючих добавок, в широкому діапазоні рухомості бетонних сумішей. До отриманих залежностей запропоновані відповідні поправки при $C/V > C/V_{кр}$.

5. Вивчена кінетика зміни рухомості фібробетонних сумішей у випадках застосування звичайного важкого і дрібнозернистого бетонів. Досліджені діапазони зміни рухомості з врахуванням факторів, що характеризують їх склад а також при введенні суперпластифікуючих добавок. Показано, що при оптимізації складу фібробетонних сумішей їх рухомість може залишатись практично стабільною протягом до 1 год. Для забезпечення збережуваності фібробетонної суміші та збільшення її тривалості, особливо при введенні суперпластифікаторів, ефективно застосовувати перемішування при її транспортуванні.

6. Вивчено вплив рухомості бетонної суміші та тривалості її віброущільнення на коефіцієнт розшарування (однорідності). Показано, що для фібробетону з композиційним дисперсним армуванням при однаковій тривалості віброущільнення розшарування є меншим, ніж для сталевібробетону. Експериментально підтверджено висловлену раніше гіпотезу про можливість уникнення або суттєвого зменшення розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування.

РОЗДІЛ 5

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ, ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ТА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ ФІБРОБЕТОНІВ З КОМПОЗИЦІЙНИМ ДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ

5.1. Пористість та водопоглинання

Низький водовміст досліджуваних фібробетонних сумішей, інтенсивна гідратація та тверднення обумовлюють відповідні особливості порової структури бетонів.

При вивченні якісних особливостей порової структури бетонів розповсюджений метод, оснований на аналізі кінетики водонасичення [134]. Цей метод оснований на емпірично встановленому взаємозв'язку параметрів експоненціальної функції, що характеризує водопоглинання бетонів в часі з інтегральними та диференціальними параметрами пористості бетону.

Встановлено [134], що криві, які характеризують зміну водопоглинання важкого бетону по мірі збільшення тривалості тверднення задовільно апроксимуються функціями, що мають наступний загальний вид:

$$W_{\tau} = W_{\max} \left[1 - e^{-(\lambda\tau)^{\alpha}} \right], \quad (5.1)$$

де W_{τ} – водопоглинання зразка за час τ ; W_{\max} – максимальне водопоглинання; λ – коефіцієнт, що характеризує середній розмір капілярних пор; α – коефіцієнт однорідності розмірів пор.

Слід відзначити, що чим нижче водопоглинання та значення коефіцієнта середнього розміру пор (λ) і чим вищий показник однорідності пор за розмірами (α), тим рівномірніше розподілені пори за розмірами, що забезпечує отримання щільної та однорідної структури матеріалу.

Для розрахунку коефіцієнтів λ та α залежно від значень W_{τ} , W_{\max} та τ в ДСТУ Б В.2.7-170:2008 запропоновані відповідні номограми.

Визначення показників пористості бетону проводили на зразках-кубах з ребром 10 см у відповідності з ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Повний об'єм пор бетону знаходили за формулою:

$$P_n = \left(\frac{\rho_{\delta} - \rho_0}{\rho_{\delta}} \right), \quad (5.2)$$

де ρ_{δ} – густина подрібненого в порошок бетону, кг/м^3 ; ρ_0 – середня густина сухого бетону, кг/м^3 .

Об'єм відкритих капілярних пор знаходили за формулою:

$$P_0 = W_0, \quad (5.3)$$

де W_0 – об'ємне водопоглинання зразків, %.

Кінетику водопоглинання визначали шляхом дискретного зважування попередньо висушених зразків в процесі їхнього водопоглинання до постійної маси.

Величину об'ємного водопоглинання розраховували за формулою:

$$W_0 = W_m \rho_0 = \frac{m_{24} - m_0}{m_{24} - m_{24}^B}, \quad (5.4)$$

де W_m – водопоглинання по масі, m_0 та m_{24} – маса зразка до занурення у воду та через 24 год після занурення, визначена на повітрі, m_{24}^B – маса зразка через 24 год після занурення у воду, ρ_0 – середня густина зразка бетону.

Результати дослідів та розрахунків приведені в табл. 5.1, і на рис. 5.1.

Аналіз даних, приведених в табл. 5.1 і на рис. 5.1 показує, що як і варто було очікувати, зменшення водовмісту та водоцементного відношення бетонних сумішей призвело до суттєвого зменшення водопоглинання як характеристики відкритої капілярної пористості.

Теоретично цей висновок слідує з аналізу формули капілярної пористості бетону:

$$P_{кан}^{\delta} = \frac{B - 0,5\alpha C}{1000}, \quad (5.5)$$

де α – ступінь гідратації цементу, C – витрата цементу, кг/м^3 .

Таблиця 5.1 – Параметри порової структури фібробетонів

№ складів	Водо-цементне відношення	Водовміст, кг/м ³	Загальна пористість, % (P_0)	Відкрита капілярна пористість, % (W_0)	Показник середнього розміру пор λ	Показник однорідності пор α	Фібра, кг/м ³	Вид та вміст пластифікатора, %
Дрібнозернистий сталевібробетон								
1	0,46	230	11,6	7,5	0,59	0,52	-	-
2	0,48	238	11,8	7,4	0,54	0,61	100	-
3	0,36	178	9,7	5,1	0,39	0,69	100	C-3 (1%)
4	0,31	155	9,9	4,9	0,33	0,71	100	Melflux (0,5%)
Фібробетон з композиційним дисперсним армуванням								
5	0,50	248	12,1	8,1	0,45	0,65	100+2	-
6	0,38	188	9,3	5,5	0,31	0,72	100+2	C-3 (1%)
7	0,32	161	9,5	5,3	0,25	0,76	100+2	Melflux (0,5%)

Примітки: 1. Номера складів бетону відповідають табл. 4.7. 2. Температура води при випробуванні бетону на водопоглинання $t=20^{\circ}\text{C}$.

Спостерігається також чітка кореляція вказаних вище характеристик та параметрів порової структури λ та α . Зменшення показника середнього розміру пор супроводжується зростанням впорядкованості структури, про що свідчить свідчить збільшення показника однорідності α .

Важливим наслідком введення суперпластифікатора в фібробетонні суміші є покращення структури поборового простору за рахунок зменшення середнього розміру пор та підвищення однорідності їхнього розподілення. Зменшення товщини водних прошарків на зернах в'язучого обумовлює зменшення середнього радіуса капілярів [135]. На зменшення радіуса пор і однорідність їхнього розподілення позитивно впливає також висока питома поверхня в'язучого. На думку В.Г. Батракова, зменшення розміру пор бетонів із суперпластифікаторами та однорідності їхнього розподілення сприяє адсорбція на активних центрах твердої фази.

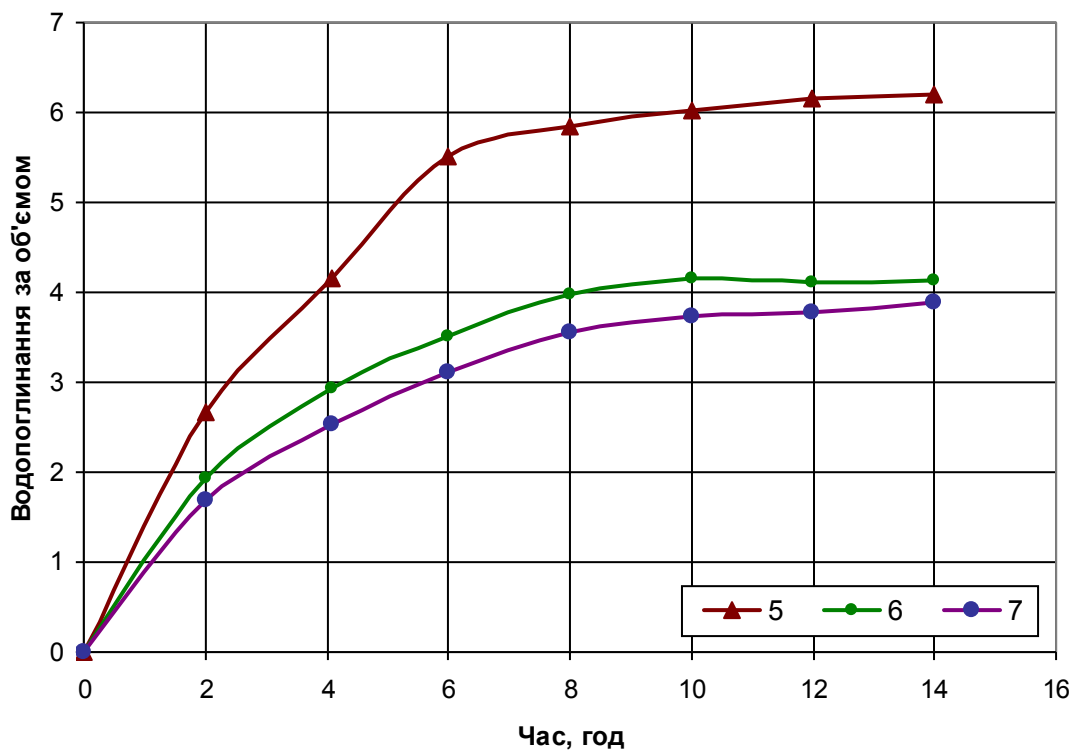
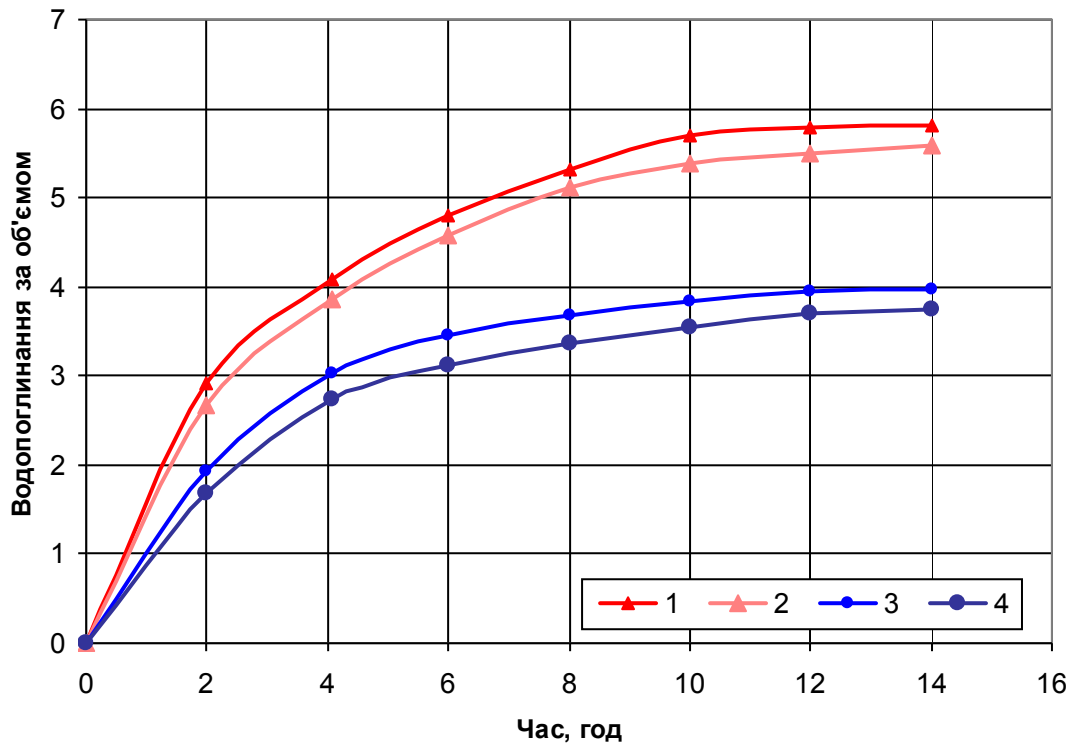


Рисунок 5.1 – Кінетика зміни водопоглинання дрібнозернистих сталевібробетонів (а) та дрібнозернистих фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням (б) (номера кривих відповідають складам, приведеним в табл. 5.1)

Базальтову фібру в даному випадку можна розглядати в якості своєї підложки [78] – поверхні, на якій випереджаючим темпом формується щільний та міцний шар цементного каменю (контактна зона), що проявляє при достатньому насиченні суміші такими волокнами суттєвий вплив на міцнісні та деформативні властивості фібробетону.

Кінетику росту водопоглинання для всіх видів бетону можна описати логарифмічними залежностями (рис. 5.1). Фібробетон з композиційним дисперсним армуванням володіє меншими показниками як середнього розміру пор λ , так і вищими показниками однорідності α (табл. 5.1).

Дисперсне армування сприяє формуванню більш дрібних, переважно замкнутих пор в порівнянні неармованим бетоном. При цьому ступінь впливу дисперсного армування зростає зі зменшенням геометричних розмірів фібр і збільшенням їх кількісного вмісту в суміші. Однак при досягненні деякого порогового значення концентрації фібр однорідність їх розподілу в суміші погіршується, утворюються грудки з волокон, не покриті цементним тістом, що негативно впливає на порову структуру матеріалу.

З наведених даних очевидно, що найкращі характеристики пористості проявляють фібробетони з композиційним дисперсним армуванням в присутності суперпластифікаторів. Все це однозначно свідчить про покращення структурних характеристик фібробетону в результаті використання комбінації сталевих та базальтових волокон.

5.2. Деформативні властивості

Особливості порової структури, склад та структура цементного каменю, його об'ємна концентрація повинні відобразитися на деформативних властивостях бетонів [26]. Г.К. Пауерсом було показано [136], що модуль пружності цементного каменю E_k пов'язаний з об'ємом пор виразом:

$$E_k = (1 - V_n)^3 E_{k.o}, \quad (5.6)$$

де $E_{k.o}$ – модуль пружності гелево-кристалічної фази цементного каменю.

При розгляді бетону як двофазової системи зі сферичними частинками, рівномірно розподіленими в цементному каменю модуль пружності розраховується [135] за допомогою теоретичного виразу:

$$E_{\sigma} = [V_k + (2 - V_k)E_s / E_k] / 2 - V_k + V_k E_s / E_k. \quad (5.7)$$

Аналіз даного виразу показує, що модуль пружності бетону повинен зростати зі збільшенням модуля пружності цементного каменю та зменшенням його вмісту в бетоні.

Наявні літературні дані про вплив добавок ПАР на модуль пружності бетону суперечливі. Більшість досліджень вважає, що введення ПАР знижує модуль пружності в результаті адсорбційного модифікування структури цементного каменю і виникнення в гідратних оболонках зерен цементу структурних елементів, що викликають збільшення поверхні ковзання частинок. При введенні пластифікуючи добавок необхідно враховувати поряд з модифікуванням структури ефекти зменшення пористості цементного каменю і зменшення пористості цементного каменю та зменшення його об'єму в бетоні.

Проаналізувавши експериментальні результати ряду досліджень В.Г. Батраков прийшов до висновку [137], що для литих бетонів введення добавки суперпластифікатору при незначному підвищенні міцності бетону призводить до маловідчутного зменшення модуля пружності. В той же час, при використанні суперпластифікатора для зменшення В/Ц та збільшення міцності, модуль пружності бетону може суттєво збільшуватися.

Характер та кількісний вплив добавок ПАР суттєво залежить від виду та мінералогічного складу в'язучих, властивостей добавок.

Для прогнозування модуля пружності бетонів запропонований [135] ряд емпіричних формул, що пов'язують його з міцністю при стиску. При проектуванні конструкцій для прогнозування модуля пружності бетону при напруженні його у віці τ широко застосовують залежності типу:

$$E_{\sigma} = \frac{E_m f_{c,cube}}{\rho + f_{\sigma}}, \quad (5.8)$$

де $f_{c,cube}$ – кубикова міцність бетону на стиск у віці τ , діб; E_m і ρ – емпіричні константи. В будівельних нормах рекомендуються значення $E_m=52000$ та $\rho=23$.

Європейським комітетом по бетону і нормами ряду країн рекомендуються для прогнозування модуля пружності залежності типу:

$$E_{\sigma} = C(f_{c,cube})^V, \quad (5.9)$$

де C і V – деякі емпіричні константи.

Різновидом залежностей виду (3.20) є формула Уокера:

$$E_{\sigma} = A\sqrt{f_{cm}}, \quad (5.10)$$

де A – коефіцієнт, що приймається в середньому 19000 (при ОК=20...26 см $A=17500$; ОК=2...4 см $A=19500$; ОК=8...10 см $A=18700$).

Найбільша збіжність розрахункових та експериментальних даних модуля пружності досліджуваних бетонів по даним [135] має місце при використанні формули (5.8). Розходження між значеннями E_{σ} , вирахованими за формулами (5.8) та (5.10) зростають в міру підвищення міцності бетону.

Інформація про результати визначення модуля пружності в фібробетонах розглядається в публікаціях [138, 139-152].

Значення модуля пружності сталеві фібробетонів, наведені в розглянутих публікаціях, перебували в діапазоні від 44300 МПа [156] до 110000 МПа [152]. Цей діапазон можна розділити на дві групи:

- 44300...57000 МПа [138, 140, 142, 144, 150] для бетонів класу за міцністю до С60;
- 57000... 110000 МПа [139, 151, 152] для бетонів класу за міцністю від С80 до С150.

Модуль пружності росте при зміні відсотка фібрового армування від 0,5 до 1,5 % - на 0,4...0,6 % [164].

Розрахункові значення модулів пружності сталеві фібробетонів $E_{fb,c}$ можна визначати, виходячи з передумови, що вони пропорційні вмісту в них за об'ємом матриці й сталевій фібрі з відповідними їм модулями пружності (E_b і E_s) [149]:

$$E_{fb} = E_b(1 - \mu_{fv}10^{-3}) + E_s\mu_{fv}10^{-3}. \quad (5.11)$$

Модуль пружності бетонів тісно пов'язаний з його деформативністю та відповідно з тріщиностійкістю. Для характеристики деформативності бетонів запропоновані різні критерії [135]. Одним з найбільш простих є відношення границі міцності при розтягу або згині до величини статистичного або динамічного модуля пружності ($E_{дин}$). Експериментально показано [26], що відношення міцності бетону на розтяг при розколюванні ($f_{p.p.}$) до $E_{дин}$, так звана «умовна розтяжність», близьке до величини граничної деформації при розтягу, пряме визначення якої достатньо трудомістке. Співвідношення між значеннями E_b та $E_{дин}$ для бетонів знаходиться в інтервалі 0,87-0,95. Менші значення $E_b/E_{дин}$ характерні для бетонів з границею міцності при стиску менше 25МПа.

Враховуючи високий рівень кореляції модуля пружності бетону з міцністю при стиску, очевидно, поряд з критерієм $f_{b.p.}/E_b$ для оцінки деформативності та тріщиностійкості бетону може бути використане і безпосереднє відношення міцності бетону на розтяг до міцності на стиск ($f_{c.tf}/f_{cm}$). Це відношення, як відомо [61], збільшується по мірі підвищення однорідності структури бетону і зменшення кількості різних дефектів, що сприяють концентрації напружень. Суттєво зростає це співвідношення для фібробетонів із дисперсним армуванням. Всі фактори, що сприяють зчепленню цементного каменю із заповнювачами та фіброю, найбільш сильно впливають на міцність фібробетону при розтягу. Величину $f_{c.tf}/f_{cm}$ визначали для бетонів, склади яких приведені в табл. 5.2 у віці 1, 7 та 28 діб.

Графічні залежності співвідношень міцності на розтяг при згині до міцності на стиск різних видів фібробетонів наведені на рис. 5.2.

Аналізуючи отримані результати дослідів, можна відзначити очікуване збільшення відношення $f_{c.tf}/f_{cm}$ для сталевібробетонів у порівнянні із неармованим бетоном (склад №1). Даний показник залежно від віку фібробетону при вмісті сталевібри 100 кг/м³ зростає в 1,8...2,2 рази і досягає максимального значення 0,196 (склад №3). Також спостерігається загальна тенденція зменшення $f_{c.tf}/f_{cm}$ з віком для всіх видів фібробетонів. Це пояснюється більш інтенсивним ростом міцності при стиску у часі у порівнянні з міцністю на

розтяг при згині. Так, якщо для композиційного фібробетону без використання пластифікаторів з 28-добовою міцністю на стиск 49,1 МПа у віці 1 доба $f_{c,tf} / f_{cm}$ складає 0,208; у віці 7 діб - 0,197; у віці 28 діб - 0,181, то для фібробетону з використанням С-3 – відповідно 0,212; 0,184; 0,177. Для композиційного фібробетону з використанням Melflux 2651f (склад №7) ці відношення рівні відповідно 0,238; 0,215; 0,210.

Таблиця 5.2 – Співвідношення $f_{c,tf} / f_{cm}$ для сталеві фібробетонів та фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням

Номер складу бетону	Міцнісні показники бетону, МПа, та їх співвідношення у віці								
	1 доба			7 діб			28 діб		
	$f_{c,tf}$	f_{cm}	$f_{c,tf} / f_{cm}$	$f_{c,tf}$	f_{cm}	$f_{c,tf} / f_{cm}$	$f_{c,tf}$	f_{cm}	$f_{c,tf} / f_{cm}$
Дрібнозернистий бетон									
1	1,8	18,6	0,095	2,4	28,7	0,085	4,2	53,1	0,079
Дрібнозернистий сталеві фібробетон									
2	3,3	17,5	0,189	5,1	29,6	0,172	8,3	50,2	0,165
3	5,4	27,6	0,196	9,4	61,9	0,152	11,5	79,3	0,145
4	7,3	38,0	0,192	13,8	73,9	0,187	16,0	90,2	0,177
Фібробетон з композиційним дисперсним армуванням									
5	4,6	22,1	0,208	6,3	31,9	0,197	8,9	49,1	0,181
6	7,6	36,1	0,212	11,8	64,4	0,184	13,9	78,5	0,177
7	10,2	42,8	0,238	16,3	75,9	0,215	19,2	91,4	0,210

Примітка: Склад №1 – без добавок пластифікаторів та без фібри; склади №2,3,4 – витрата сталеві фібри 100 кг/м³; №5,6,7 – витрата сталеві фібри 100 кг/м³, базальтової – 2 кг/м³.

Загалом спостерігається суттєве підвищення відношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску у випадку введення до складу фібробетону базальтової фібри. При порівнянні аналогічних складів фібробетонів 2-4 (сталеві фібробетон) та 5-7 (поліармований фібробетон) відзначається зростання цього відношення для композиційного фібробетону на 10...25%. Найбільше

значення показника $f_{c,tf}/f_{cm}$ для фібробетону з композиційним дисперсним армуванням досягається для складу №7 і складає 0,210 у віці 28 діб.

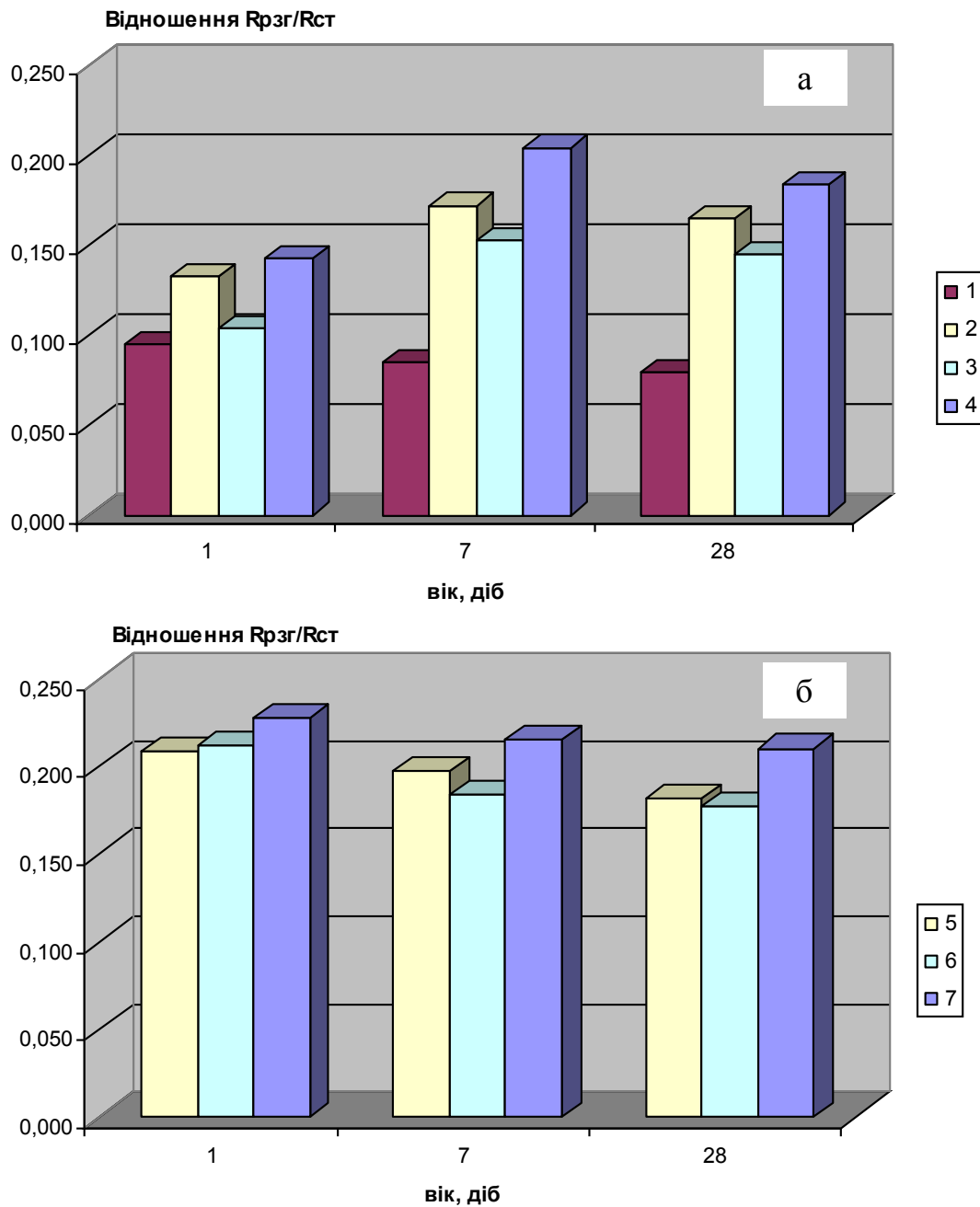


Рисунок 5.2 – Співвідношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску дрібнозернистих сталевібробетонів (а) та фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням (б) (номера стовпців відповідають складам, наведеним в табл. 4.7)

5.3. Усадочні деформації

Тріщиностійкість бетонів і фібробетонів в значній мірі визначається також усадочними деформаціями. А.Е. Десов запропонував [23], як один з критеріїв тріщиностійкості цементного каменю, так званий модуль T :

$$T = f_{c,tf} / \varepsilon_{yc}, \quad (5.12)$$

де $f_{c,tf}$ – міцність зразків на розтяг; ε_{yc} – величина усадочних деформацій до моменту появи тріщин.

Модуль T при співставних витратах цементного тіста та незмінних заповнювачах може слугувати, очевидно, і для порівняльної характеристики тріщиностійкості бетонів.

На усадці бетонів позначаються численні фактори, вирішальним з яких є витрата води. При незмінній витраті води в суміші величина ε_{yc} мало залежить від витрати цементу та Ц/В [26]. В той же час відома позитивна роль дисперсного армування структури бетону в плані зменшення усадочних деформацій.

Усадочні деформації бетонів і фібробетонів, склади яких приведені в табл. 5.3 визначали за допомогою штативного прибору, оснащеного індикатором часового типу з ціною поділки 0,001 мм. Зразки зберігали при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$ і відносній вологості $75 \pm 5\%$. Криві усадочних деформацій наведені на рис. 5.3. Їх аналіз показує, що для всіх досліджуваних складів усадочні деформації стабілізуються до віку 60 діб.

Граничні усадочні деформації фібробетонів, що досягаються до 60-добового віку в залежності від складу коливається в інтервалі від 5,2 до 7,8 ($\times 10^{-4}$). Найбільш низькі значення усадки характерні для фібробетону з композиційним дисперсним армуванням з мінімальним вмістом води, і суперпластифікатором Melflux 2651F (склад №7). При постійному водовмісті усадочні деформації дещо збільшуються із збільшенням вмісту суперпластифікатора. До 7 добового віку усадка сягає до 30...40% граничних значень, 28 діб – 50%, 90 діб – 85...95%.

Таблиця 5.3 – Значення усадочних деформацій ε_{yc} і модуля тріщиностійкості бетонів

№ складів	Значення ε_{yc} та модуля Т для бетонів та фібробетонів у віці					
	28 діб			90 діб		
	ε_{yc}	$f_{c,tf}$, МПа	$f_{c,tf} / \varepsilon_{yc}$	ε_{yc}	$f_{c,tf}$, МПа	$f_{c,tf} / \varepsilon_{yc}$
1	7,2	4,6	0,64	7,8	4,4	0,56
2	6,2	3,5	0,56	6,5	3,6	0,55
3	5,95	14,3	2,40	6,25	14,5	2,32
4	5,8	7,9	1,36	6,2	7,9	1,27
5	5,5	10,8	1,97	5,7	11	1,93
6	5,0	16,2	3,24	5,2	16,3	3,13
7	4,4	12,1	2,75	4,6	12,4	2,70

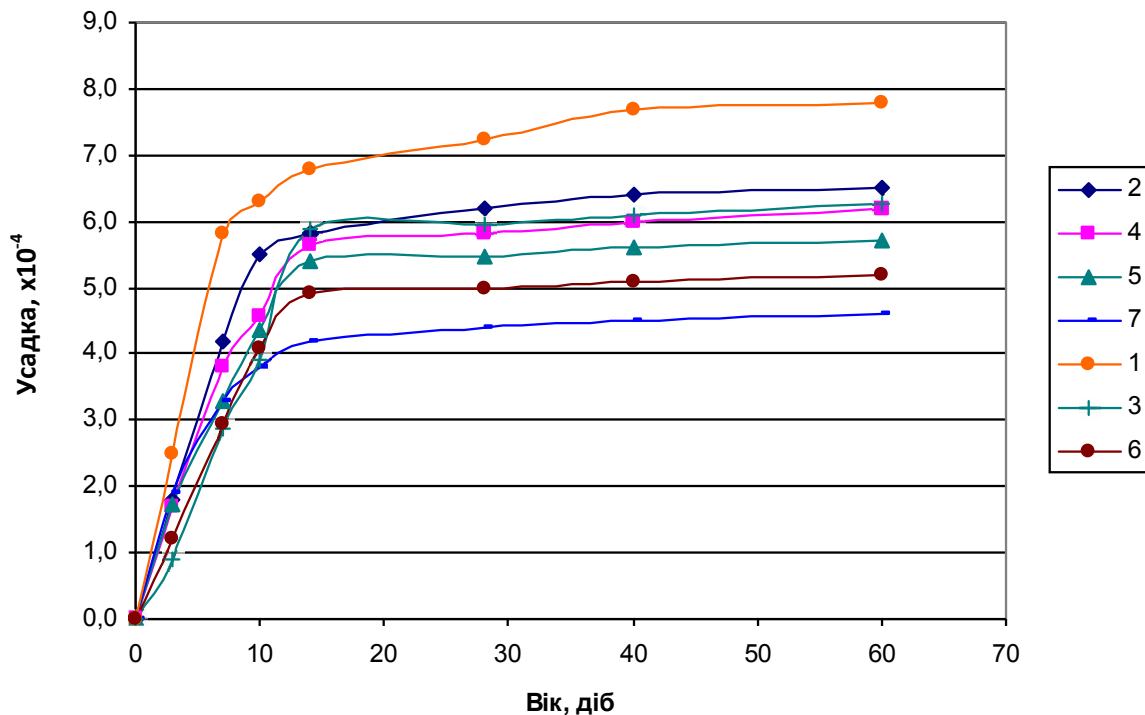


Рисунок 5.3 – Криві усадочних деформацій
Номера кривих відповідають складам, наведеним в табл. 4.7

Введення сталеві фібри в оптимальній кількості, встановленій з позицій міцнісних характеристик, позитивно позначається на зменшенні усадки, хоча цей вплив і не є значним. В цілому усадочні деформації для фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням є нижчими на 20...30% за усадку сталеві фібробетонів і до 70% за усадку дрібнозернистого бетону, що очевидно пояснюється позитивним впливом базальтової фібри.

Для встановлення впливу на величину усадочних деформацій вмісту базальтової фібри проводили дослідження на композиційному фібробетоні із вмістом сталевих хвилястої фібри типу Ф1 100 кг/м^3 і варіюванням вмісту базальтової фібри від 0 до 6 кг/м^3 (рис. 5.4). Також наведені результати для порівняння впливу іншого виду сталевих фібри, а саме Ф2, на усадку композиційного фібробетону (рис. 5.5). При цьому вміст базальтової фібри був зафіксований на встановленому раніше оптимальному значенні 2 кг/м^3 .

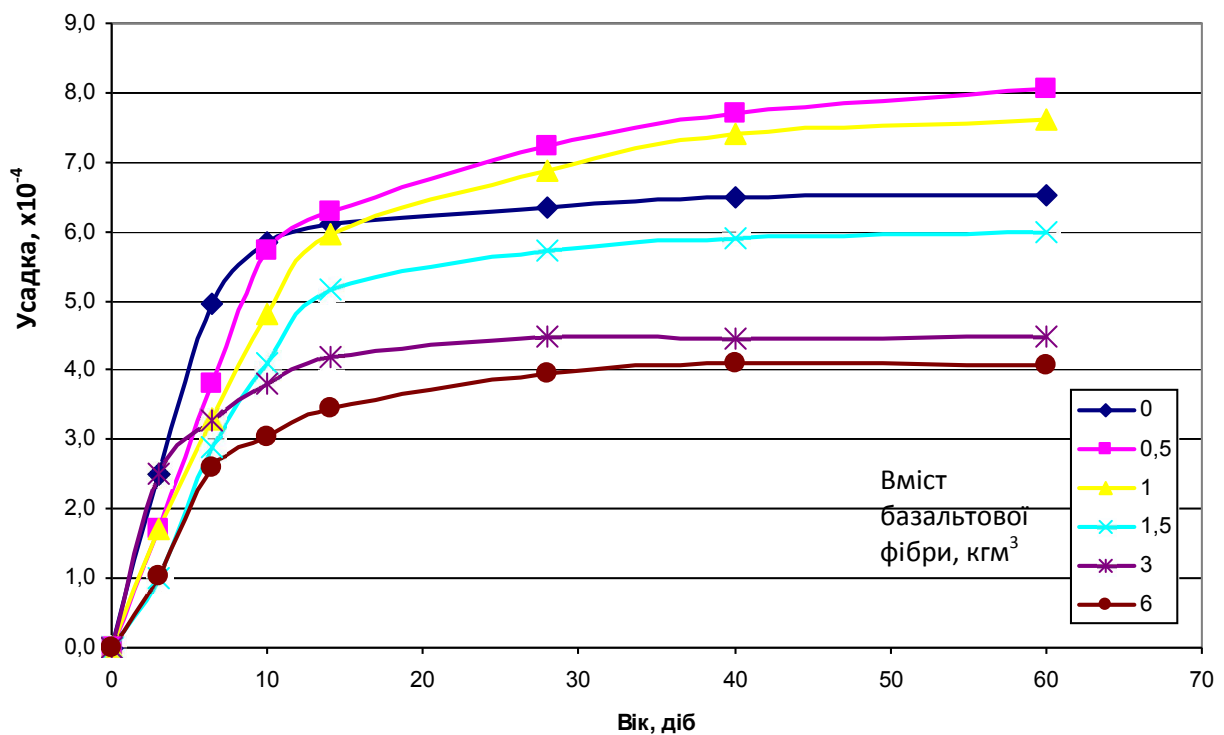


Рисунок 5.4 – Криві усадочних деформацій композиційного фібробетону із вмістом базальтової фібри від 0 до 6%

Залежно від типу фібри й відсотку армування деформації усадки фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням можуть бути як рівні, так і більше або менше деформацій бетонної матриці (рис. 5.4, 5.5). Цей результат можна пояснити впливом на усадку фібробетону двох різних процесів. Один з них створює умови для збільшення усадки фібробетону в порівнянні з усадкою матриці, а інший навпаки перешкоджає розвитку усадочних деформацій. При цьому ступінь впливу цих процесів залежить від типу фібри та її вмісту.

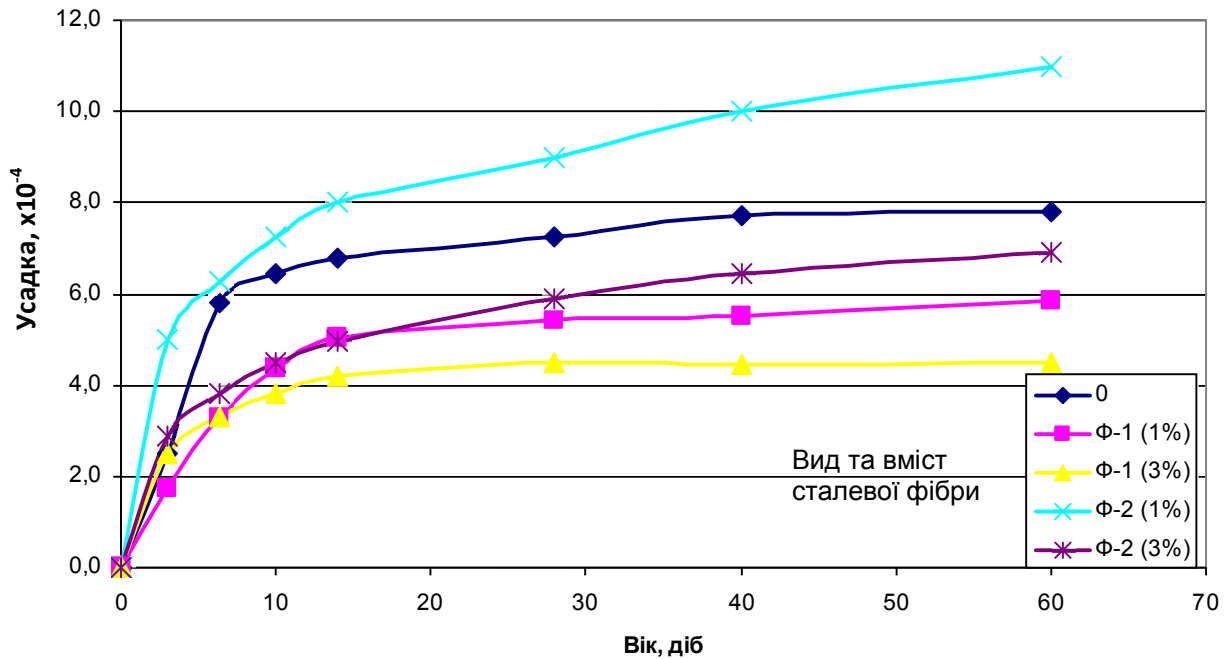


Рисунок 5.5 – Криві усадочних деформацій композиційного фібробетону із вмістом базальтової фібри 2 кг/м^3 залежно від використання сталевих фібри типу Ф-1 та Ф-2

Анкерна фібра типу Ф-2 під час перемішуванні й укладання сталеві фібробетонної суміші розущільнює її, створюючи в ній заповнені пароповітряною сумішшю пори, подальше випарування яких приводить до збільшення усадки.

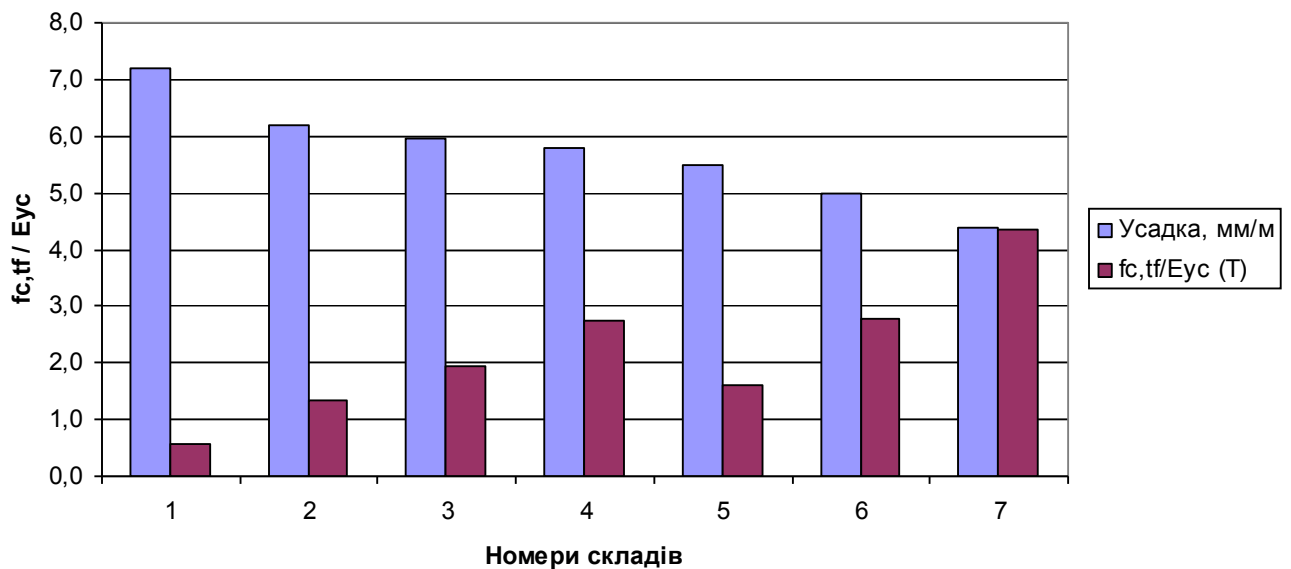


Рисунок 5.6 – Значення модуля $\Gamma = f_{c,tf}/\epsilon_{yc}$ у віці 28 діб для досліджуваних складів фібробетонів (номера складів відповідно до табл. 4.7)

Хвиляста фібра типу Ф-1, що має хороше зчеплення по всій своїй довжині із затверділою матрицею зменшує усадочні деформації матриці. Зменшення усадочних деформації має місце також при більших відсотках армування.

В табл. 5.3 приведені для досліджуваних складів фібробетонів значення усадочних деформацій і модуля тріщиностійкості у віці 28 та 60 діб, з яких слідує, що для всіх складів як сталеві фібробетону (2-4), так і фібробетону з композиційним армуванням (5-7) при зменшенні величини ε_{yc} , спостерігається тенденція до зростання значення модуля Т (рис. 5.6).

5.4. Морозостійкість

У відповідності із сучасними уявленнями бетонознавства [26] морозостійкість бетону визначається комплексом факторів, і в першу чергу, їх капілярною пористістю, а також співвідношенням об'ємів відкритих капілярних та закритих повітряних пор. Суттєве значення поряд з хіміко-мінералогічним складом цементного клінкера має вид і вміст добавок.

Для фібробетонів, поряд з тим, велике значення має характер і вид дисперсного армування [39]. Фіброві волокна, підвищуючи міцність на розтяг бетону, дозволяють краще протидіяти напруженням, що виникають в процесі замерзання води в капілярах.

Відомо [137], що застосування композиційних мінеральних в'язучих, дозволяє в бетонних сумішах з полікарбосилатним суперпластифікатором довести капілярну пористість до 5%, що відповідно з відомими рекомендаціями повинно забезпечувати достатньо високу морозостійкість. Разом з цим, дані про вплив добавок суперпластифікаторів на морозостійкість бетонів суперечливі. В роботі [137] повідомлялось про високу морозостійкість бетонів з добавкою суперпластифікатора С-3 при понижених В/Ц в результаті ущільнення структури цементного каменю і бетону та зменшення капілярної пористості пропорційно зниженню кількості води замішування. Однак, на думку більшості спеціалістів в бетонах із суперпластифікаторами погіршується порова структура, збільшуються

розміри капілярів і відстані між закритими порами. По даним японських спеціалістів задовільна морозостійкість високоміцних бетонів з $V/C=0,3$ забезпечується при повітровтягуванні не менше 5%. Вказані міркування послуговували основою для рекомендацій [137] вводити в бетони високої морозостійкості поряд із суперпластифікатором повітровтягуючі добавки.

В дрібнозернистих бетонах на дію суперпластифікаторів на структуру порового простору певний вплив має підвищена дисперсність системи. Остання, збільшуючи поверхню розділу «мінеральна частина-вода», повинна сприяти поряд із збільшенням адсорбційної активності добавок ПАР також покращенню структури порового простору. Наші досліди (табл. 5.1) показали, що для досліджуваних дрібнозернистих сталевібробетонів та композиційних фібробетонів характерним є поряд із зменшенням капілярної пористості зменшення їх розмірів і підвищення однорідності розподілу пор. За даними В.Г. Батракова [137] в бетонах на в'язучому марки 500 при $V/Vж=0,31$ і міцності при стиску в 28 діб 59,8 МПа після 500 циклів коефіцієнт морозостійкості склав 1,08. В той же час бетони на вихідному бездобавочному портландцементі і цементі з добавкою С-3 при $V/Vж=0,40$ і міцності 36 МПа витримали лише 300 циклів заморожування та відтавання при коефіцієнті морозостійкості відповідно 0,88 та 0,89.

Для сталевібробетонів характерними є достатньо високі значення морозостійкості, на що впливають як характеристики порової структури бетону, так і характер і ступінь дисперсного армування. Значення марки за морозостійкістю для таких бетонів зазвичай коливаються від F100 до F600, а для високоміцних бетонів можуть досягати F1000 і більше [153].

Для бетонних сумішей досліджуваних складів визначали компресійним способом повітровтягнення. Знаючи об'єм відкритих капілярних пор, що чисельно дорівнює об'ємному водопоглинанню ($V_{\text{кап.пор}}=W_o$) і об'єму замерзаючої води ($V_{з.в.}$), а також об'єм втягнутого повітря ($V_{в.п.}$), розраховували ступінь насичення (СН) – перший структурний критерій морозостійкості, запропонований Т. Уайтсайдом і Х.Свитом [23]:

$$CH = \frac{V_{з.в.}}{V_{з.в.} + V_{в.п.}} \quad (5.13)$$

Було встановлено, що при $CH < 0,88$ бетон є морозостійким, а при $CH > 0,91$ швидко руйнується. Морозостійкість (F) зв'язана з величиною CH зворотною залежністю:

$$F \sim \frac{1}{CH} = 1 + \frac{V_{в.п.}}{V_{з.в.}} \quad (5.14)$$

З розрахункових значень CH (табл. 5.4) слідує, що для фібробетонів, особливо з використанням добавок суперпластифікаторів, можна прогнозувати достатньо високу морозостійкість.

Вказаний прогноз був підтверджений прямими експериментальними дослідженнями. Визначення морозостійкості проводили на зразках розміром $10 \times 10 \times 10$ см за третім методом згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 з водонасиченням в 5% розчині хлориду натрію із заморожуванням до температури $(-50 \pm 2)^\circ\text{C}$ і відтаванням при температурі $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Морозостійкість оцінювали по зміні кубикової міцності зразків після 4, 8, 15, 19, і 27 циклів поперемінного заморожування й відтавання, число яких відповідало марці по морозостійкості F150, F300, F500, F600, F800.

Таблиця 5.4 – Повітровтягування фібробетонних сумішей

№	В/Ц	Фібра, кг/м ³	Вид та вміст пластифікатора, %	Об'єм втягнутого повітря, (V _{в.п.}), %	Критерій $CH = \frac{V_{\text{кап.пор}}}{V_{\text{кап.пор}} + V_{\text{в.п.}}}$
Дрібнозернистий сталеві фібробетон					
1	0,46	–	–	1,4	0,84
2	0,48	100	–	2,7	0,73
3	0,36	100	C-3 (1%)	2,2	0,70
4	0,31	100	Melflux (0,5%)	3,1	0,61
Фібробетон з композиційним дисперсним армуванням					
5	0,50	100+2*	-	2,4	0,77
6	0,38	100+2*	C-3 (1%)	2,1	0,72
7	0,32	100+2*	Melflux (0,5%)	2,9	0,65

* Вказаний сумарний вміст сталеві та базальтової фібри.

Оцінку морозостійкості по втраті маси не проводили, оскільки попередньо проведені експерименти показали, що зразки зі сталевібробетонів та матриці практично не пошкоджуються і тому втрати настільки незначні, що їх важко виявити, враховуючи протилежний ефект, викликаний насиченням зразків солями.

Також в якості критерію морозостійкості використовували коефіцієнт морозостійкості K_F , який представляє собою відношення міцності при стиску основних зразків через певну кількість циклів перемінного заморожування і відтавання та міцності контрольних зразків. В табл. 5.5 представлені число циклів, що відповідає марці за морозостійкістю та значення коефіцієнта морозостійкості. На рис. 5.7, 5.8 показана зміна кубикової міцності під час випробувань зразків.

Таблиця 5.5 – Результати визначення морозостійкості фібробетонів

№	В/Ц	Фібра, кг/м ³	Вид та вміст пластифікатора, %	Кількість циклів за третім методом	Марка за морозостійкістю	Коефіцієнт морозостійкості
Дрібнозернистий сталевібробетон						
1	0,46	–	–	8	300	0,95
2	0,48	100	–	15	500	0,98
3	0,36	100	C-3 (1%)	19	600	0,94
4	0,31	100	Melflux (0,5%)	27	800	1,01
Фібробетон з композиційним дисперсним армуванням						
5	0,50	100+2*	-	15	500	0,98
6	0,38	100+2*	C-3 (1%)	19	600	0,96
7	0,32	100+2*	Melflux (0,5%)	27	800	0,99

* Вказаний сумарний вміст сталеві та базальтової фібри.

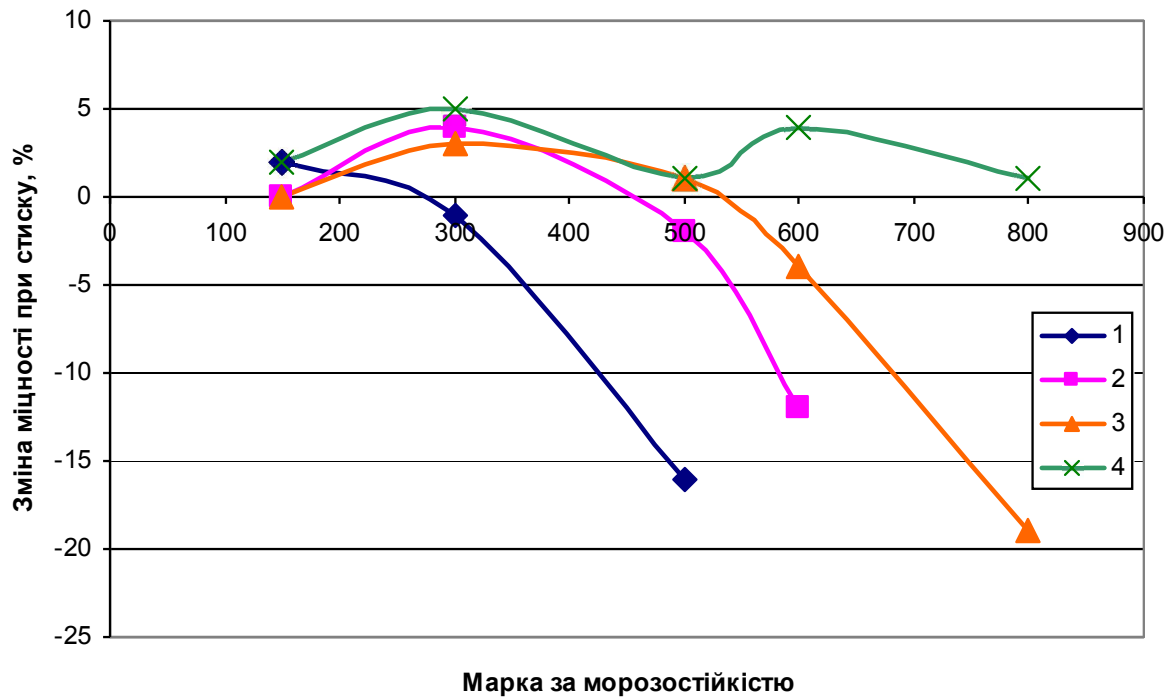


Рисунок 5.7 – Залежність зміни міцності зразків дрібнозернистого бетону та сталевібробетону від кількості циклів заморожування відтавання (номера складів відповідно до табл. 4.7)

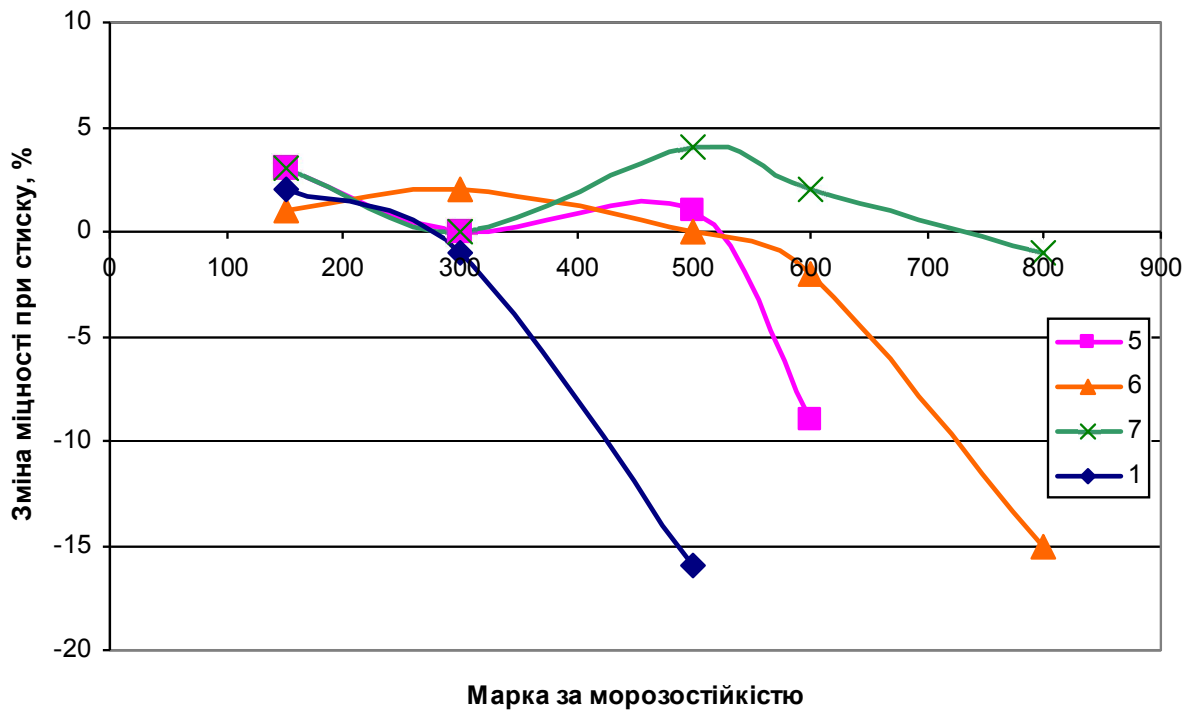


Рисунок 5.8 – Залежність зміни міцності зразків дрібнозернистого бетону та фібробетону з композиційним дисперсним армуванням від кількості циклів заморожування відтавання (номера складів відповідно до табл. 4.7)

Як видно з даних табл. 5.5, отримані значення морозостійкості достатньо добре корелюють із розрахунковими значеннями критерію СН. В той же час, накладається фактор наявності фібри, що добре прослідковується в збільшених значеннях морозостійкості в т. 2 і 5 у порівнянні із т. 1.

Необхідно відзначити коливання зміни міцності зразків під час випробувань (тобто коефіцієнта морозостійкості) як в меншу, так і в більшу сторону (рис. 5.7, 5.8). Ріст міцності бетону в окремих випадках можна пояснити заповненням пор бетону кристалами солей із розчину, якими насичувалися зразки під час проведення випробувань. Також суттєвого впливу на морозостійкість фібробетонних зразків від введення базальтової фібри в досліджуваних умовах зафіксовано не було.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження впливу факторів складу на морозостійкість фібробетонів, показали досягнення марок за морозостійкістю F800 і, потенційно, ще більше для складів №4 та 7 з використанням композиційного дисперсного армування та гіперпластифікатора Melflux 2651f.

5.5. Динамічні характеристики фібробетонів

Бетон пружно-пластичний матеріал, який при дії статичних навантажень чітко проявляє пластичні властивості. Водночас, при дії динамічних навантажень бетон, може вести себе по різному, а саме: витримувати значні динамічні впливи, при цьому збільшуючи статичний опір стиску, розтягу або сколюванню, або руйнуватись під дією значних динамічних навантажень [154, 155]. Вважається, що чим менше тривалість дії динамічних навантажень тим більше перевищує динамічний опір статичний. Така тривалість складає десяті частини секунд, або декілька секунд, якщо за цей час навантаження не зменшиться то бетон зруйнується. Варто зазначити, що зустрічаються випадки зменшення динамічного опору бетону в порівнянні зі статичним [155, 156] це притаманно крихким високо міцним бетонам, що обов'язково необхідно враховувати при

проектуванні складів високоміцних бетонів.

В загальному до динамічних характеристик бетонів та фібробетонів відносять наступні – тріщиностійкість, ударна міцність, ударна в'язкість [130, 157].

Тріщиностійкість визначається здатністю витримувати ударні навантаження без утворення тріщин. Для фібробетонів прийнято визначати міцнісні характеристики на стандартних зразках не тільки без тріщин, а й за певної ширини їх розкриття [158-160].

Вплив факторів дисперсного армування на ударну міцність фібробетонів. Для випробування високоміцних фібробетонів на ударну міцність були виготовлені зразки-куби з довжиною ребра 10 см. В якості армуючих елементів використовувалися сталеві хвиляста фібра довжиною 60, 40 і 20 мм а також базальтові волокна довжиною 12 мм.

Ударна міцність оцінювалася за величиною роботи A , що витрачається на руйнування зразка, віднесеної до його об'єму. У табл. 5.6 та на рис. 5.9 представлені результати визначення роботи, витраченої на руйнування зразка фібробетону, в залежності від виду, вмісту та довжини армуючого елемента.

Як видно з отриманих результатів, введення до складу дрібнозернистого бетону дисперсних армуючих елементів суттєво збільшує роботу, необхідну на руйнування зразків. максимальне значення A досягається при композиційному дисперсному армуванні – $31,5 \text{ Дж/см}^3$, що в 3,5 більше, ніж в контрольного зразка без фібри. Також підтверджується раніше зроблений висновок про позитивний вплив базальтової фібри на властивості фібробетону. Як видно з рис. 5.9, збільшення вмісту базальтових волокон при полідисперсному армуванні приводить до зростання роботи руйнування і досягає свого максимуму при витраті в 4 кг/м^3 . Так при витраті сталеві фібри 80 кг/м^3 збільшення складає 35%, а при 120 кг/м^3 – понад 80%. Подальший ріст вмісту базальтової фібри є недоцільним і приводить до поступового зменшення ударної міцності, що пояснюється складністю рівномірного розподілу волокон в бетонній матриці.

Таблиця 5.6 – Робота руйнування зразків фібробетону
в залежності від довжини і дозування волокна

Витрата сталеві фібри ($l = 60$ мм), кг/м ³	Витрата базальтової фібри ($l = 12$ мм), кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка базальтової фібри в загальному об'ємі армування n , %	Робота витрачена на руйнування зразка A , Дж/см ³
-	-	-	-	9,2
Базальтова фібра ($l = 12$ мм)				
80	0	1,03	0,00	17
	2	1,10	0,07	19,8
	4	1,18	0,13	22,8
	6	1,25	0,18	20,2
120	0	1,54	0,00	20,2
	2	1,61	0,05	25,7
	4	1,69	0,09	31,5
	6	1,76	0,13	20,9

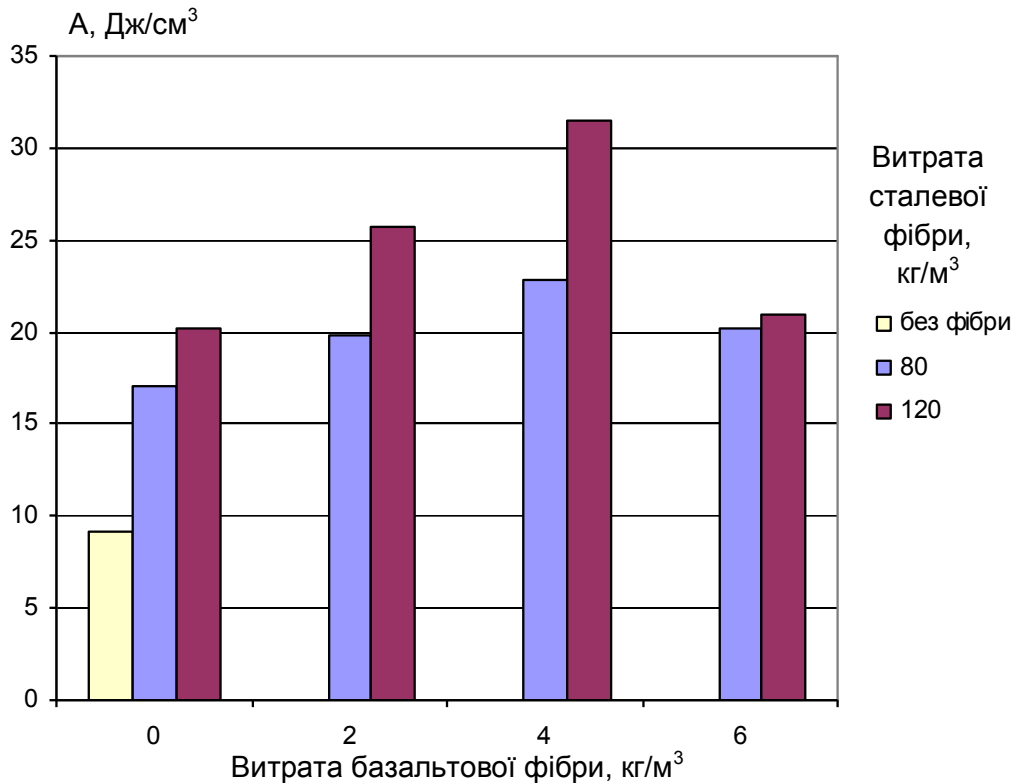


Рисунок 5.9 – Робота руйнування фібробетону в залежності від виду та вмісту дисперсного армування

Можна відзначити також, що для складів фібробетонів із вмістом сталеві фібри 80 кг/м^3 при витраті базальтової фібри 2 кг/м^3 досягається практично така ж ударна міцність, як при моноармуванні сталеві фіброю в кількості 120 кг/м^3 , а при витраті 4 кг/м^3 – вона стає більшою на 15%.

За допомогою проведеного планованого експерименту, встановлений взаємозв'язок між ударною міцністю полідисперсно армованого фібробетону та параметрами армування. В якості двох факторів варіювання виступали: вміст сталеві фібри $120 \pm 20 \text{ кг/м}^3$ (x_1) та довжина сталеві фібри $40 \pm 20 \text{ мм}$ (x_2). В усіх випадках використовували базальтові фібру в кількості 4 кг/м^3 .

В результаті отримана повна квадратична залежність роботи руйнування (A) від вказаних факторів впливу:

$$A = 29,5 - 1,3 \cdot x_1 + 2,4 \cdot x_2 - 6,8 \cdot x_1^2 - 2,7 \cdot x_2^2 + 2,4 \cdot x_1 x_2 \quad (5.15)$$

На основі отриманої моделі побудована поверхня відгуку (роботи руйнування) від досліджуваних факторів (рис. 5.10.).

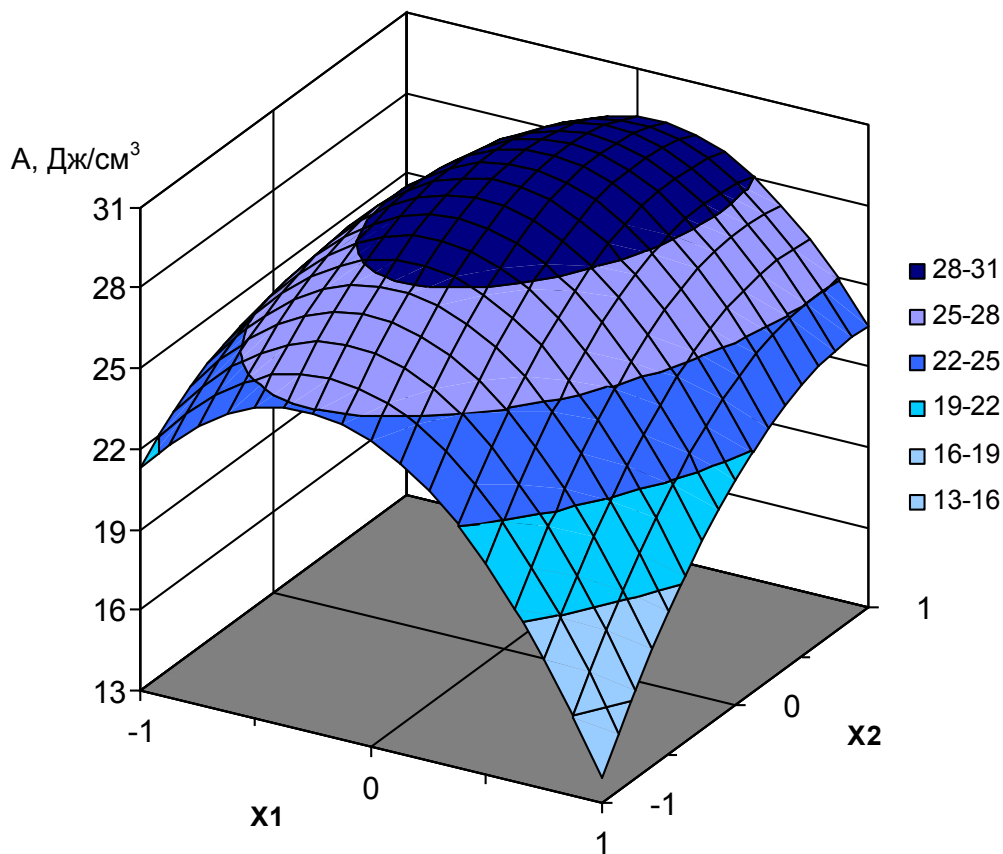


Рисунок 5.10 – Робота руйнування зразків фібробетону із композиційним дисперсним армуванням залежно від вмісту сталеві фібри (x_1) та довжини волокон (x_2) при вмісті базальтової фібри 4 кг/м^3

Встановлено зниження показника ударної міцності композиційного дисперсноармованого бетону із збільшенням дозування сталевого волокна понад 120 кг/м^3 ($\mu=1,5\%$). Максимальний показник ударної міцності склав $31,8 \text{ Дж/см}^3$ перевищуючи контрольне значення неармованого бетону більше ніж в 3,5 рази. Поява першої тріщини композиційного фібробетону зафіксовано після нанесення 36 ударів, утворення тріщин бетону контрольного складу настало відразу ж після нанесення 14 ударів, при цьому ширина розкриття першої тріщини в бетоні контрольного складу досягала 1 мм, а в дисперсно-армованому бетоні не перевищувала 0,2 мм.



Рисунок 5.11 – Експериментальні зразки після випробування на ударну міцність:

- а) дрібнозернистий бетон; б) дрібнозернистий фібробетон з композиційним дисперсним армуванням

Тріщиностійкість фібробетону, армованого волокнами довжиною 40 і 60 мм, перевищує таку для бетону, армованого волокнами довжиною 20 мм. При використанні волокон довжиною понад 40 мм відбувається більше перекривання одного волокна іншим, внаслідок чого утворювані тріщини швидко згасають. Волокна довжиною 20 мм перекриваються в меншій мірі, в зв'язку з чим, протяжність і ширина розкриття тріщин збільшується.

Загалом з рис. 5.10 чітко простежується зона оптимальних значень ударної міцності: вміст сталеві фібри $110...125 \text{ кг/м}^3$ ($x_1 = -0,5...0,25$) та довжина її волокон $40...60 \text{ мм}$ ($x_1 = 0...1$). За таких умов значення роботи руйнування будуть складати не менше 28 Дж/см^3 .

Ударна в'язкість фібробетону із композиційним дисперсним армуванням. Для випробування композиційного дисперсно-армованого фібробетону на ударну в'язкість були виготовлені зразки – балочки розміром $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$. В якості армуючих елементів були використані хвиляста сталева фібра Ф-1 довжиною 60 мм і базальтові волокна довжиною 12 мкм .

Для виготовлення дослідних зразків використовували цемент ПЦ-І М500 ПАТ «Волинь-цемент», заповнювач фракційної суміші – $0,16...2 \text{ мм}$ (кварцовий пісок з $M_{кр}=2,1$) та $2...5 \text{ мм}$ (гранітний щебінь) у співвідношенні $0,45:0,55$. Необхідна рухомість суміші $13...15 \text{ см}$ досягалася за рахунок введення добавки гіперпластифікатора. Melflux 2651f. Витрата цементу складала 550 кг/м^3 , В/Ц = $0,35$.

Зразки, що застосовувались для випробування, мали форму бруска квадратного перерізу з надрізом посередині глибиною 8 мм . Випробуваний зразок укладався щільно на опори копра таким чином, щоб надріз був розташований симетрично опор і протилежно удару, що наноситься. За кутом відхилення маятника після удару або за шкалою визначається робота, витрачена на руйнування зразка.

$$A_n = \frac{P \cdot L}{\cos \beta - \cos \alpha}; \quad (5.16)$$

де P - вага маятника, кгс (Н); L - довжина маятника – відстань від осі до центру ваги, м; α і β - кути підйому маятника відповідно до і після зламу зразка, град.

Ударна в'язкість a_n [Дж/м^2], визначалася з виразу:

$$a_n = \frac{A_n}{S}; \quad (5.17)$$

де A_n – робота удару, витрачена на злам зразка, Дж; S – площа поперечного перерізу зразка в місці надрізу до випробування, m^2 . Робота руйнування зразка при ударному згині на маятниковому копрі представлена в табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Робота руйнування в залежності від виду та вмісту дисперсного армування

№	Вид дисперсного армування	Вміст фібри, $кг/м^3$	Робота руйнування, $Дж/м^2$
1	–	–	1,16
2	СФ	80	7,05
3	СФ	120	8,28
4	СФ+БФ	80+4	10,14
5	СФ+БФ	120+4	11,47

Як впливає з даних, наведених в табл. 5.7, величина ударної в'язкості зразка бетону контрольного складу склала $1,16 \text{ Дж/м}^2$. Робота витрачена на руйнування дисперсно-армованого бетону, змінювалася залежно від виду та вмісту використовуваних армуючих волокон. Встановлено, що введення сталеві фібри в кількості 80 кг/м^3 приводить до збільшення ударної в'язкості в 6 разів (робота руйнування $7,05 \text{ Дж/м}^3$), а в кількості 120 кг/м^3 – більше ніж в 7 разів ($8,28 \text{ Дж/м}^3$). Встановлено, що робота руйнування зразків із композиційним дисперсним армуванням в середньому збільшується на 30% і досягає максимального значення в $11,47 \text{ Дж/м}^3$ при вмісті сталеві і базальтової фібри відповідно 120 і 4 кг/м^3 . Як і у випадку з ударною міцністю можна відзначити, що комбінація сталеві+базальтова фібра в кількості $80+4 \text{ кг/м}^3$ може замінити моноармований фібробетон з витратою сталеві фібри 120 кг/м^3 . Величина ударної в'язкості в обох випадках є практично однаковою.

Таким чином, дисперсне армування забезпечує збільшення опору ударним навантаженням, за рахунок поглинання енергії удару волокнами. Бетони з такими властивостями можна використовувати в місцях підвищеної сейсмічної активності, при влаштуванні дорожніх і аеродромних покриттів, що піддаються ударним навантаженням.

Матеріали розділу 5 опубліковано автором у працях [161-162].

Висновки до розділу

1. Вивчено комплекс властивостей фібробетонів, що характеризують особливості їх структури, деформативність і морозостійкість. Показники, що характеризують середній розмір пор та однорідність порового простору фібробетонів суттєво покращуються при введенні добавок суперпластифікаторів, особливо полікарбоксилатного типу. Введення суперпластифікатора Melflux 2651F дозволяє зменшити водопоглинання на 30...40%, що корелює з їх водоредукуючим ефектом. Найкращі характеристики пористості проявляють фібробетони з композиційним дисперсним армуванням.

2. Експериментально визначено, що для фібробетонів, особливо композиційних, при збільшенні тривалості тверднення до 28 діб відношення міцності на розтяг при згині до міцності на стиск ($f_{c,tf} / f_{cm}$), що не прямо характеризує пружні властивості бетонів, зменшується значно в меншій мірі ніж для бетону без дисперсного армування. Зафіксоване суттєве підвищення відношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску у випадку введення до складу фібробетону базальтової фібри. При порівнянні аналогічних складів сталеві фібробетонів та поліармованих фібробетонів відзначається зростання цього відношення для композиційного фібробетону на 10...25%.

3. Отримані експериментальні дані по визначенню усадки свідчать, що усадочні деформації сталеві фібробетонів, як і у випадку звичайних бетонів, залежать від водовмісту бетонної суміші але, крім того, суттєвим фактором є також витрата фібри. Відзначено, що більший вміст фібри в фібробетоні з композиційним дисперсним армуванням нівелює його підвищену водопотребу. Зменшення усадочних деформацій і збільшення міцності на розтяг при згині таких бетонів приводить до відповідного збільшення модуля тріщиностійкості.

4. Дисперсне армування бетону можна розглядати як додатковий чинник, поряд із зменшеною капілярною пористістю, що додатково впливає на морозостійкість. Експериментальні дослідження показали, що для

полідисперсно-армованих фібробетонів при витраті фібри 100 кг/м^3 досягається морозостійкість до 500 циклів, а з добавками суперпластифікаторів – 600...800. Встановлено, що полікарбоксилатний суперпластифікатор дозволяє отримувати сталеві фібробетони із морозостійкістю 800 і більше циклів.

5. Виявлено значне підвищення міцності фібробетонів в умовах динамічних навантажень. Встановлено, що найбільшою ударною міцністю володіє композиційний фібробетон, з вмістом сталеві фібри 120 кг/м^3 та базальтової фібри 4 кг/м^3). Максимальний показник ударної міцності склав $31,8 \text{ Дж/см}^3$ перевищуючи контрольне значення неармованого бетону більше ніж в 3,5 рази. Для складів фібробетонів із вмістом сталеві фібри 80 кг/м^3 при витраті базальтової фібри 2 кг/м^3 досягається практично така ж ударна міцність, як при моноармуванні сталеві фіброю в кількості 120 кг/м^3 , а при витраті 4 кг/м^3 – вона стає більшою на 15%.

6. Отримано математичну модель зміни ударної міцності композиційного фібробетону від рецептурно-технологічних факторів. Встановлено зниження показника ударної міцності композиційного дисперсноармованого бетону із збільшенням дозування сталеві волокна понад 120 кг/м^3 ($\mu=1,5\%$) та при переході від довжини сталеві з 40...60 мм до 20 мм.

7. Встановлено зростання ударної в'язкості фібробетонів в 6...7 разів по відношенню до контрольного неармованого бетону в залежності від виду та вмісту армуючих елементів. Максимальне поглинання енергії удару забезпечують сталеві волокна в композиції з базальтовими. Робота руйнування зразків із композиційним дисперсним армуванням в середньому збільшується на 30% у порівнянні із сталеві фібробетонами і досягає максимального значення в $11,47 \text{ Дж/м}^3$ при вмісті сталеві і базальтової фібри відповідно 120 і 4 кг/м^3 .

РОЗДІЛ 6

ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ ВИСОКОМІЦНИХ ФІБРОБЕТОНІВ З КОМПОЗИЦІЙНИМ ДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ

6.1. Проектування складів фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням

Проектування складу – один з найважливіших етапів технології бетону. Від того, наскільки правильно визначений склад бетону, залежать його властивості, довговічність і економічність.

У зв'язку із цим серйозна увагу приділяється розробці нових і вдосконаленню існуючих способів визначення складу бетону. Цьому питанню присвячені роботи багатьох дослідників [23, 26, 129, 163-169]. Вони охоплюють майже всі існуючі модифікації бетонів (важкі, легкі, спеціального призначення тощо). Спосіб визначення складу конкретного виду бетону розробляється з урахуванням його специфічних особливостей. Що ж стосується фібробетонів, те для нього в літературі практично відсутні обґрунтовані правила, що дозволяють при визначенні співвідношення його компонентів враховувати специфічні особливості останніх і їх взаємодію при формуванні макроструктури, забезпечуючи при цьому одержання однорідних фібробетонних сумішей, високої якості, заданої рухомості, міцності і довговічності.

Формування макроструктури фібробетонної композиції, її щільність, визначається як компонентами бетонної матриці, так і фібровою арматурою, її геометричними параметрами, орієнтуванням, ступенем насичення. Тому призначення складу, власне, самого бетону без врахування параметрів армування, як це прийняте в більшості робіт [3, 66, 148, 149, 151, 170], є однією з вагомих причин погіршення якості суміші при введенні до її складу дисперсної арматури і зниження ефективності фібрового армування.

У технології бетонів відомі десятки способів розрахунків складу бетону. Останнім часом розробляються методи більш точної оцінки впливу якості матеріалів і умов виготовлення на властивості бетонів.

Незважаючи на істотні відмінності, принцип підбору складу бетону у всіх методиках один: врахування сумарної поверхні заповнювачів і пустотності між їхніми зернами при визначенні витрати цементу або цементного тіста.

В даній роботі на основі експериментально-статистичних моделей запропоновано методики проектування складів фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням, які дозволяють отримувати розрахункові значення витрат компонентів сумішей, необхідних для забезпечення нормованого комплексу їх будівельно-технічних властивостей.

Розрахунок складу фібробетону номографічним методом.

Для розрахунку складів бетонів різного виду часто застосовуються номограми вихідних параметрів, побудованих на основі експериментально-статистичних моделей [105]. Відповідно до В.А.Вознесенського [171] це є типова задача управління, що полягає у визначенні таких комбінацій факторів, які забезпечують задані показники вихідного параметру. Для цього з отриманого рівняння регресії (наприклад, міцності на розтяг при згині (табл. 4.5)) вибирають один з факторів. В результаті розв'язку рівняння регресії відносно цього фактора, визначаємо необхідні його значення, що забезпечує при зміні інших факторів задане значення вихідного параметра. На рис. 6.1 наведена номограма для визначення витрати цементу при заданій міцності композиційного фібробетону на розтяг при згині. Дана номограма в сукупності з комплексом отриманих моделей (табл. 4.5), може бути використана для проектування складів композиційних фібробетонів з комплексом заданих властивостей.

Залежно від конкретних умов визначальними параметрами складу сталеві фібробетону можуть бути або водоцементне відношення або витрати сталеві та базальтової фібри. При проектуванні складів за табл. 6.1 визначаємо

бажаний діапазон в якому може знаходитись склад фібробетону із заданими значеннями міцності на стиск і розтяг при згині.

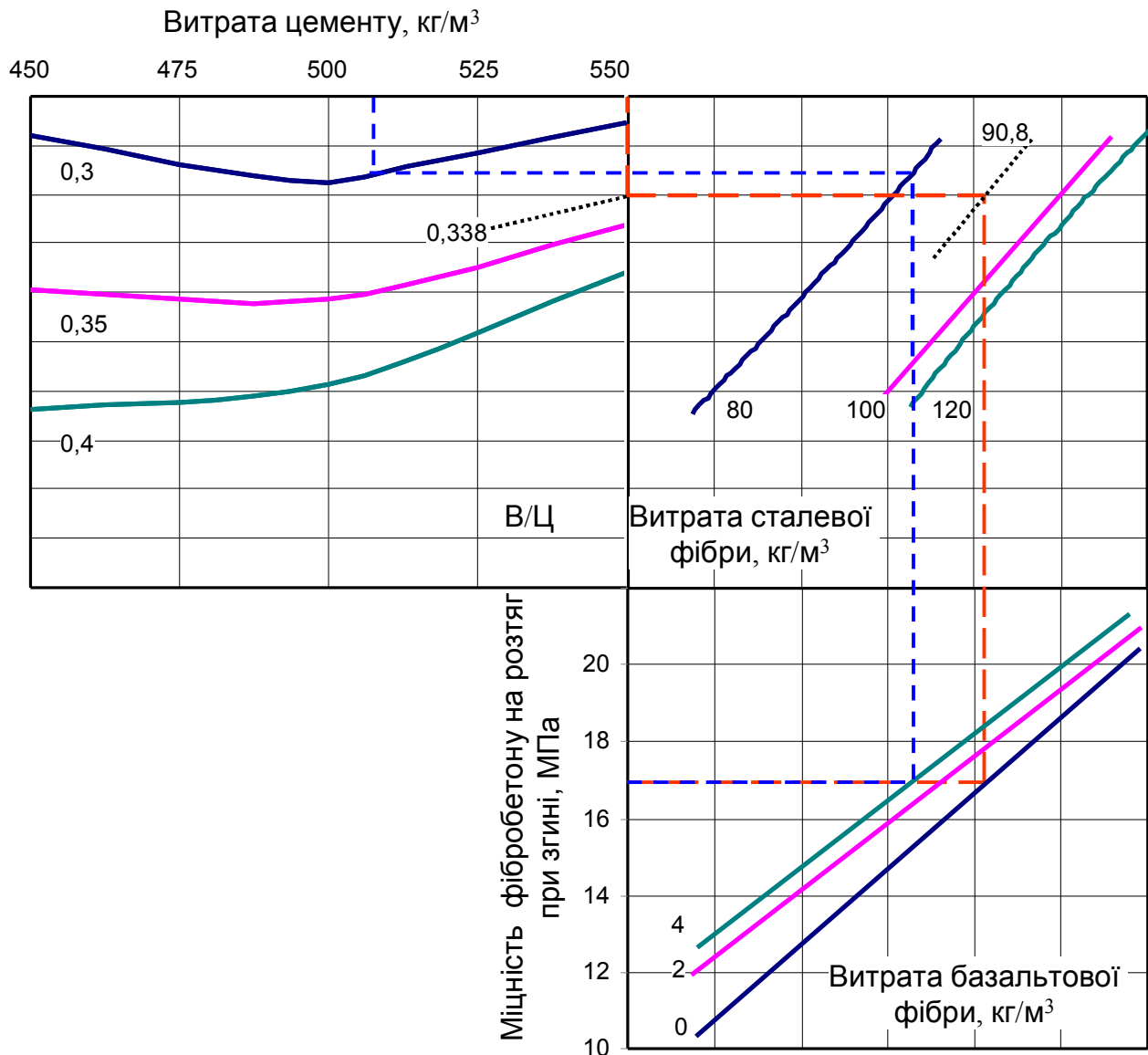


Рисунок 6.1 – Номограма міцності фібробетону з композиційним дисперсним армуванням на розтяг при згині у віці 28 діб

Прийнявши певні витрати фібри або значення водоцементного відношення по номограмі, наведеній на рис. 6.1, визначаємо основні параметри складу бетонної суміші, які будуть забезпечувати задану міцність бетону на розтяг при згині.

Переведення значень параметрів складу фібробетонної суміші в кодовий вигляд проводиться за наступними залежностями:

$$x_1 = \frac{Ц - 500}{50}; x_2 = \frac{В / Ц - 0,35}{0,05}; x_3 = \frac{СФ - 100}{20}; x_4 = \frac{БФ - 2}{2}, \quad (6.1)$$

де Ц, СФ, БФ – відповідно витрати цементу, сталевий фібри та базальтової фібри.

Таблиця 6.1 – Орієнтовні значення міцнісних характеристик композиційного фібробетону у віці 28 діб

Витрата базальтової фібри, кг/м ³	Витрата сталевий фібри, кг/м ³	В/Ц	$f_{c,tf}^{28}$, МПа	f_{cm}^{28} , МПа
0...2	80...100	0,3...0,35	14,2...17,8	70,3...95,3
		0,35...0,4	10,5...17,8	55,8...81,2
	100...120	0,3...0,35	16,7...20,95	68,9...94,4
		0,35...0,4	16,7...18,5	54,2...79,1
2...4	80...100	0,3...0,35	16,2...20,5	71,1...94,8
		0,35...0,4	12,1...17,17	55,9...82,0
	100...120	0,3...0,35	18,2...23,5	69,3...96,3
		0,35...0,4	17,8...18,8	55,8...79,7

Підставивши отримані значення в рівняння (табл. 4.5), перевіряємо забезпеченість необхідної міцності бетону при стиску у віці 28 діб.

Розраховуємо при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу витрати води за формулою:

$$В = Ц \cdot B / Ц. \quad (6.2)$$

Підставляємо переведені в кодовий вигляд значення витрати цементу, фібри та водоцементного відношення в рівняння (табл. 4.5), і визначаємо витрату суперпластифікатора полікарбонатного типу, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 13...15 см. При необхідності забезпечення іншої рухомості бетонної суміші вміст суперпластифікатора уточнюється експериментально.

При знайдених значеннях витрати цементу та води, за відомими методиками [23] по формулах (6.3-6.6) визначаємо витрати заповнювачів враховуючи, що

оптимальне співвідношення піску та щебеню фракції 2...5 мм за масою складає 45% та 55% відповідно.

Об'єм заповнювача:

$$V_3 = 1000 - V_{ц.т.} = 1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{В}{\rho_в} + \frac{СФ}{\rho_с} + \frac{БФ}{\rho_{бф}} \right). \quad (6.3)$$

Маса заповнювача (пісок + щебінь):

$$m_3 = V_3 \cdot \rho_3; \quad (6.4)$$

$$m_{п} = m_3 \cdot 0,45; \quad (6.5)$$

$$m_{щ} = m_3 \cdot 0,55. \quad (6.6)$$

де $\rho_ц$, ρ_3 , $\rho_с$, $\rho_{бф}$ – істинна густина цементу, заповнювача, сталі, базальтової фібри, $V_{ц.т.}$ – об'єм цементного тіста.

Приклад розрахунку 1. Розрахувати склад дрібнозернистого фібробетону з композиційним дисперсним армуванням з 28-добовою міцністю при стиску 70 МПа та міцністю на розтяг при згині 17 МПа, істинна густина суміші заповнювача (пісок і щебінь гранітний фракції 2...5 мм) $\rho_3 = 2,7 \text{ г/см}^3$.

1. За табл. 6.1 визначаємо діапазон В/Ц та витрати фібри, в якому може знаходитись склад фібробетону із заданими значеннями міцності на стиск на розтяг при згині. В даному випадку цей діапазон максимально широкий – це витрати сталевий фібри 80...120 кг/м³, базальтової – 0...4 кг/м³ та водоцементне відношення 0,3...0,4.

2. За номограмою (рис. 6.1, синя лінія), задавшись з позицій економії мінімальною витратою сталевий фібри 80 кг/м³, визначаємо необхідну витрату цементу і водоцементне відношення, які б забезпечували виконання поставленої вимоги щодо міцності фібробетону на розтяг при згині.

3. Переводимо отримані значення (Ц=507 кг/м³, В/Ц=0,3, СФ=80 кг/м³, БФ=4 кг/м³) в кодовий вигляд:

$$X_1 = \frac{(Ц - 500)}{50} = \frac{(520 - 500)}{50} = 0,13;$$

$$X_2 = \frac{(B/\Pi - 0,35)}{0,05} = \frac{(0,3 - 0,35)}{0,05} = -1;$$

$$X_3 = \frac{(C\Phi - 100)}{20} = \frac{(80 - 100)}{20} = -1;$$

$$X_4 = \frac{(B\Phi - 2)}{2} = \frac{(4 - 2)}{2} = 1.$$

4. Підставляємо отримані значення в рівняння з табл. 4.5 та перевіряємо чи забезпечується необхідна міцність бетону при стиску у віці 28 діб 75 МПа.

$f_{cm} = 78,4 + 5 \cdot 0,13 - 14,2 \cdot (-1) - 0,1 \cdot (-1) + 1 \cdot 1 - 1,1 \cdot (0,13)^2 - 0,6 \cdot (-1)^2 - 0,7 \cdot (-1)^2 - 1,3 \cdot 1^2 - 0,1 \cdot 0,13 \cdot (-1) + 0,2 \cdot 0,13 \cdot (-1) - 0,35 \cdot (-1) \cdot (-1) = 91,4$ МПа. Умова виконується $91,4 \geq 75$ МПа.

5. Розраховуємо, при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу, витрати води за формулою:

$$B = \Pi \cdot V/\Pi = 507 \cdot 0,3 = 152 \text{ л/м}^3.$$

6. Підставляємо переведені в кодований вигляд значення витрати цементу ($X_1=0,13$) водоцементного відношення ($X_2=-1$), сталеві фібри ($X_3=-1$) та базальтової ($X_4=1$) в рівняння з табл. 4.5 і визначаємо витрату суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 13...15 см.

$$\begin{aligned} \text{Melflux 2651f} = & 0,41 + 0,095 \cdot 0,13 - 0,33 \cdot (-1) + 0,12 \cdot (-1) + 0,11 \cdot 1 - 0,06 \cdot 0,13^2 + \\ & + 0,2 \cdot (-1)^2 - 0,03 \cdot (-1)^2 - 0,02 \cdot 1^2 - 0,07 \cdot 0,13 \cdot (-1) - 0,02 \cdot 0,13 \cdot (-1) + 0,04 \cdot 0,13 \cdot 1 - \\ & - 0,05 \cdot (-1) \cdot (-1) + 0,04 \cdot (-1) \cdot 1 + 0,04 \cdot (-1) \cdot 1 = 0,93\% \text{ від маси цементу.} \end{aligned}$$

7. Визначаємо витрати заповнювачів за виразами (6.2-6.5):

$$V_3 = 1000 - V_{ц,г} = 1000 - \left(\frac{\Pi}{\rho_{ц}} + B \right) =$$

$$= 1000 - \left(\frac{507}{3,1} + 152 \right) = 684,5 \text{ л.}$$

$$m_3 = V_3 \cdot \rho_3 = 684,5 \cdot 2,7 = 1848 \text{ кг/м}^3;$$

$$m_{п} = m_3 \cdot 0,45 = 1848 \cdot 0,45 = 832 \text{ кг/м}^3;$$

$$m_{щ} = m_3 \cdot 0,55 = 1848 \cdot 0,55 = 1016 \text{ кг/м}^3.$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 507 кг/м^3 , вода – 152 л/м^3 , щебінь фракції 2-5 мм – 1016 кг/м^3 , пісок – 832 кг/м^3 . Витрата суперпластифікатора Melflux 2651f складає 0,93% від маси цементу, витрата сталеної фібри 80 кг/м^3 , базальтової фібри – 4 кг/м^3 .

Розрахований склад фібробетону необхідно перевірити експериментально.

Розрахунок складу фібробетону за критерієм мінімальної вартості.

При проектуванні складів бетону основними критеріями їх оптимізації зазвичай виступають мінімальна витрата цементу або мінімально можлива вартість бетону. Для звичайних бетонів ці критерії зазвичай співпадають. В обох випадках обов'язковим є забезпечення комплексу нормованих властивостей бетонної суміші та бетону.

Сучасні бетони є багатокомпонентними системами, вартість окремих компонентів яких може наближатись або перевищувати вартість цементу. До таких бетонів можна віднести фібробетони. Вони відрізняється наявністю мінімум трьох компонентів (цементу, фібри та добавки пластифікатора), вміст яких може змінюватись в широкому діапазоні і які чинять основний вплив на сумарну вартість фібробетону. Для композиційного фібробетону таких компонентів стає чотири, враховуючи наявність двох видів фібри при полідисперсному армуванні.

Таким чином, задача проектування складу фібробетону за умови мінімізації його вартості при застосуванні традиційного підходу суттєво ускладнюється.

Для прикладу, на рис. 6.2 розглянутий випадок, коли необхідну міцність на розтяг при згині 17 МПа можна досягнути при одній й тій же витраті базальтової фібри (4 кг/м^3) але при різних В/Ц (0,3 і 0,4), різних витратах сталеної фібри (80, 100 і 120 кг), що відповідно приводить до різних витрат цементу (507, 516 та 472 кг). Якщо ще врахувати необхідність окремого визначення витрати суперпластифікатора, який впливає як на властивості бетону, так і на його вартість, а також можливість забезпечення іншого показника якості (наприклад,

міцності при стиску), то стає зрозумілим, що задачу оптимізації складу фібробетону розв'язати номографічним способом практично неможливо.

Для вирішення задач проектування складів фібробетонів в умовах багатоваріантності їх розв'язку доцільно застосовувати методи математичного програмування [171-173].

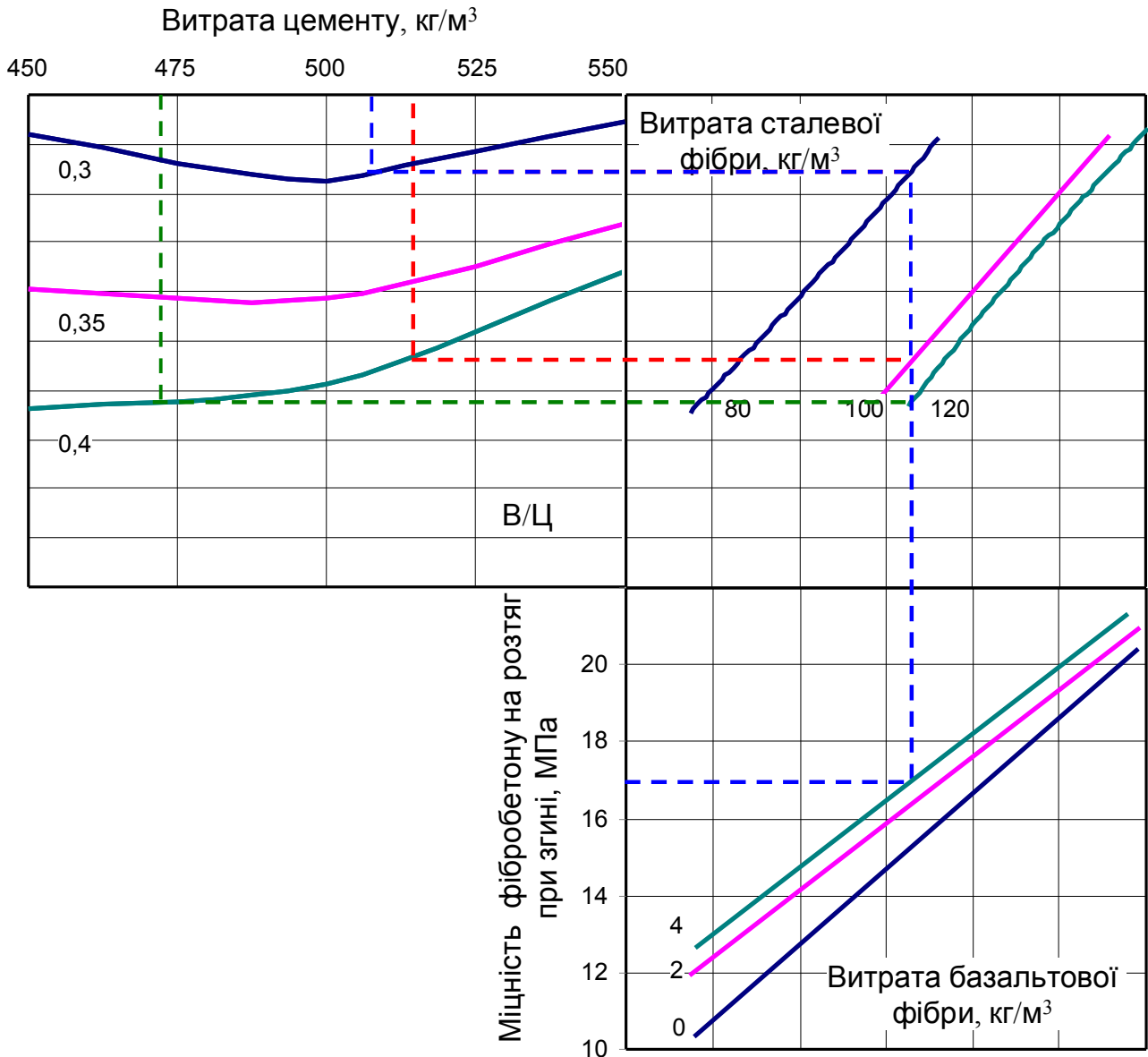


Рисунок 6.2 – Багатоваріантність розв'язку вирішення задачі проектування складу фібробетону з композиційним дисперсним армуванням номографічним методом

Умову задачі знаходження оптимального складу фібробетону із заданими показниками якості можна сформулювати наступним чином: знайти значення факторів складу фібробетону $x_1 \dots x_n$, що дозволяють мінімізувати його вартість:

$$V_{\Phi B} = V_{\psi} \cdot \psi + V_{\Delta} \cdot \Delta + V_{\Phi} \cdot \Phi \rightarrow \min \quad (6.7)$$

за умови забезпечення необхідних показників якості

$$P_1 \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (6.8)$$

$$P_2 \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

.....

$$P_m \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\text{при } x_1 \dots x_n \in [a \dots b], \quad (6.9)$$

де V_{ψ} , V_{Δ} , V_{Φ} – відповідно вартість цементу, добавки модифікатора (суперпластифікатора, активної мінеральної добавки тощо) та фібри, у.о./кг;

ψ , Δ , Φ – відповідно витрата цементу, добавки модифікатора та фібри, кг/м³ фібробетону;

$P_1 \dots P_m$ – задані показники якості фібробетону; $x_1 \dots x_n$ – фактори складу; a , b – обмеження на можливі значення факторів.

При проектуванні складу фібробетону із композиційним дисперсним армуванням враховується також витрата та вміст базальтової фібри ($B\Phi$ та $V_{B\Phi}$).

Для того, щоб розрахувати оптимальний склад композиційного фібробетону для прикладу, розглянутого вище, необхідно розв'язати задачу математичного програмування з наступною постановкою: *знайти такий склад фібробетонної суміші, який би дозволяв забезпечити необхідну міцність при стиску та розтягу при згині у віці 28 днів при мінімальній сумарній вартості в межах допустимих значень факторів.*

Найбільш раціональним способом вирішення такої задачі є використання програмного середовища Microsoft Excel, зокрема його додаток "Пошук рішення". Ця надбудова призначена для пошуку рішення рівнянь та задач оптимізації.

Послідовність розрахунку наступна. Підставляємо у моделі міцності при стиску та при згині (табл. 4.5) значення міцностей, що повинні забезпечуватись, а

у вираз (6.7) – значення вартості компонентів фібробетону. У виразі 6.9 встановлюємо обмеження значень факторів (в кодованих значеннях від -1 до 1). Далі програма перебирає різні комбінації факторів забезпечуючи не менше заданих значення міцностей за виразами (6.8) та (6.9) мінімізуючи при цьому функцію (6.7). Для встановлення вартості фібробетону під час ітерацій паралельно визначається необхідний вміст суперпластифікатора за відповідним рівнянням (табл. 4.5) при знайдених проміжних значеннях факторів $x_1 \dots x_4$.

Результатом таких ітерацій є визначення оптимальних значень факторів складу: В/Ц, витрати цементу, сталевोї та базальтової фібри, а також суперпластифікатора. Витрати води та заповнювача можна знайти за виразами (6.2.-6.6).

Приклад розрахунку 2. Визначити склад дрібнозернистого фібробетону з міцністю у віці 28 діб при стиску 70 МПа та міцністю на розтяг при згині 17 МПа із рухомістю суміші 13...15 см використовуючи експериментально-статистичні моделі (табл. 4.5). Приймаємо вартості основних компонентів фібробетону наступними, у.о./кг: $V_{Ц} = 3$; $V_{Ф} = 50$; $V_{БФ} = 90$; $V_{СП} = 260$.

Матеріали: портландцемент М500, дрібний заповнювач з модулем крупності $M_k = 3,5$ середньої якості та дійсною густиною $\rho_3 = 2,7$ кг/л. Передбачається використання суперпластифікатора Melflux 2651f.

1. Підставляючи значення міцності при стиску та згині у відповідні вирази (табл. 4.5), отримаємо функції обмежень (6.8) задачі:

$$\begin{aligned} 78,4 + 5 \cdot X_1 - 14,2 \cdot X_2 - 0,1 \cdot X_3 + 1 \cdot X_4 - 1,1 \cdot X_1^2 - 0,6 \cdot X_2^2 - 0,7 \cdot X_3^2 - 1,3 \cdot X_4^2 - \\ - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,2 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,35 \cdot X_2 \cdot X_3 \geq 70; \\ 17,85 + 0,66 \cdot X_1 - 2,03 \cdot X_2 + 2,32 \cdot X_3 + X_4 + 0,88 \cdot X_1^2 + 0,33 \cdot X_2^2 - \\ - 1,62 \cdot X_3^2 - 0,57 \cdot X_4^2 - 0,75 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,18 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,19 \cdot X_3 \cdot X_4 \geq 17. \end{aligned}$$

2. У вираз (6.7) підставляємо значення вартості компонентів фібробетону, а також задаємо обмеження значень факторів: від -1 до 1 (в кодованому вигляді).

3. За допомогою програмного додатку "Пошук рішення" знаходимо значення факторів, що задовольняють обмеження задачі і мінімізують загальну вартість фібробетону:

$$x_1 = 1; x_2 = -0,238; x_3 = -0,459; x_4 = -1.$$

При таких значеннях факторів за відповідними моделями (табл. 4.5) $f_{c,tf}^{28} = 17$ МПа, що відповідає необхідному значенню міцності на розтяг при згині, а $f_{cm}^{28} = 83,0$ МПа, що є більшим необхідного значення міцності при стиску.

4. Значення факторів в натуральному вигляді визначаємо за виразами (6.1):

$$Ц = 50 \cdot x_1 + 500 = 50 \cdot (1) + 500 = 550 \text{ кг/м}^3;$$

$$В/Ц = 0,05 \cdot x_2 + 0,35 = 0,05 \cdot (-0,238) + 0,35 = 0,338;$$

$$СФ = 20 \cdot x_3 + 100 = 20 \cdot (-0,459) + 100 = 90,8 \text{ кг/м}^3;$$

$$БФ = 2 \cdot x_4 + 2 = 2 \cdot (-1) + 2 = 0.$$

5. Витрата суперпластифікатора за відповідними моделями (табл. 4.5):

- у % від маси цементу:

$$СП' = 0,41 + 0,095 \cdot X_1 - 0,33 \cdot X_2 + 0,12 \cdot X_3 + 0,11 \cdot X_4 - 0,06 \cdot X_1^2 + 0,2 \cdot X_2^2 - 0,03 \cdot X_3^2 - 0,02 \cdot X_4^2 - 0,07 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,02 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,04 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,05 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,04 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,04 \cdot X_3 \cdot X_4 = 0,456\%;$$

- за масою:

$$СП = СП' \cdot Ц / 100 = 0,456 \cdot 550 / 100 = 2,51 \text{ кг/м}^3.$$

6. Значення мінімально можливої вартості 1 м³ фібробетону без врахування вартості заповнювача та води (знаходиться під час ітерацій в програмному додатку "Пошук рішення", вираз (6.7)):

$$В_{ФБ} = 3 \cdot 550 + 260 \cdot 2,51 + 50 \cdot 90,8 = 6842,7 \text{ у.о.}$$

7. Витрата води за виразом (6.2):

$$В = 550 \cdot 0,338 = 185,9 \text{ л.}$$

8. Витрата заповнювача за виразом (6.3):

$$З = \left(1000 - \left(\frac{550}{3,1} + \frac{90,8}{7,85} + \frac{177,5}{1} \right) \right) \cdot 2,7 = 1687 \text{ кг}.$$

Остаточний склад фібробетонної суміші, кг/м³:

$$Ц = 550; В = 147; З = 1687; СФ = 90,8; БФ = 0; СП = 2,51.$$

Розрахунок оптимального складу композиційного фібробетону номографічним способом виглядав би наступним чином (рис. 6.1, червона лінія). Очевидно, що розв'язати подібну задачу методом перебору багатьох варіантів вручну неможливо.

На етапі формулювання задачі визначення складу фібробетону необхідно коректно задаватись бажаними значеннями міцностей при стиску та розтяг при згині. Очевидно, що ці значення повинні знаходитись в межах мінімально та максимально можливого значення вихідного параметру, оскільки саме в цих межах поліноміальна модель адекватно описує досліджувану властивість. Такі значення можна досить легко знайти використовуючи вже згаданий програмний додаток "Пошук рішення". Так для розглядуваного прикладу 2 граничні значення міцностей в межах області варіювання факторів будуть наступними:

$$f_{cm}^{28}(\min) = 55,8 \text{ МПа}; f_{cm}^{28}(\max) = 96,3 \text{ МПа}; f_{c,tf}^{28}(\min) = 10,5 \text{ МПа};$$

$$f_{c,tf}^{28}(\max) = 23,6 \text{ МПа}.$$

Можливим є також деякий вихід за граничні межі вихідних параметрів. В цьому випадку, поряд із задачею оптимізації вирішується також екстраполяційна задача, що дозволяє приймати значення факторів поза межами області варіювання (наприклад, $x_1 \dots x_3 = 1,1; 1,2; 1,3$). Однак необхідно мати на увазі, що екстраполяція може бути пов'язана з певними помилками і ці помилки стають більш відчутними, чим далі вихід за межі області варіювання. Екстраполяція можлива, якщо за результатами досліджень не виникає сумнівів, що поза межами області варіювання факторів характер функції залишається без змін.

Розглянемо ще один приклад розрахунку, який включає фіксацію одного з факторів на певному рівні.

Приклад розрахунку 3. Умови задачі повністю відповідають вихідним даним до прикладу 2, але додатково необхідно обмежити витрату сталевих фібри мінімально можливим значенням, тобто $SФ = 80 \text{ кг/м}^3$.

1. Функції обмежень задачі аналогічні п.1 (приклад 2).
2. Задаємо обмеження значень факторів: $x_1 = x_2 = x_3 = -1 \dots 1$; $x_3 = -1$ (в кодованому вигляді). Значення вартості компонентів фібробетону підставляємо у вираз (6.7).
3. За допомогою програмного додатку "Пошук рішення" знаходимо значення факторів, що задовольняють обмеження задачі і мінімізують загальну вартість фібробетону:

$$x_1 = 1; x_2 = -0,652; x_3 = -1; x_4 = -0,37.$$

При таких значеннях факторів за відповідними виразами (табл. 4.5) $f_{c,tf}^{28} = 17$ МПа, що відповідає необхідному значенню міцності на розтяг при згині, а $f_{cm}^{28} = 89,7$ МПа, що забезпечує необхідне значення міцності при стиску.

4. Значення факторів в натуральному вигляді визначаємо за виразами (6.1):

$$Ц = 50 \cdot x_1 + 500 = 50 \cdot 1 + 500 = 550 \text{ кг};$$

$$В/Ц = 0,05 \cdot x_2 + 0,35 = 0,05 \cdot (-0,652) + 0,35 = 0,317;$$

$$СФ = 20 \cdot x_3 + 100 = 20 \cdot (-1) + 100 = 80 \text{ кг}.$$

$$БФ = 2 \cdot x_4 + 2 = 2 \cdot (-0,37) + 2 = 1,26 \text{ кг}.$$

5. Витрата суперпластифікатора за відповідним виразом (табл. 4.5):

$$\text{- у \% від маси цементу: } СП' = 0,749\%;$$

$$\text{- за масою: } СП = СП' \cdot Ц / 100 = 0,749 \cdot 550 / 100 = 4,12 \text{ кг}.$$

6. Значення мінімально можливої вартості 1 м^3 фібробетону без врахування вартості заповнювача та води:

$$В_{фб} = 3 \cdot 550 + 260 \cdot 4,12 + 50 \cdot 80 = 7048,4 \text{ у.о.}$$

7. Витрата води за виразом (6.2):

$$В = 550 \cdot 0,317 = 174,6 \text{ л}.$$

8. Витрата дрібного заповнювача за виразом (6.3):

$$З = \left(1000 - \left(\frac{550}{3,1} + \frac{80}{7,85} + \frac{1,26}{2,7} + \frac{174,6}{1} \right) \right) \cdot 2,7 = 1721 \text{ кг}$$

Остаточний склад фібробетонної суміші, кг/м^3 :

$$Ц = 550; В = 175; З = 1721; СФ = 80; БФ = 1,26; СП = 4,12.$$

Аналізуючи отриманий склад і порівнюючи його з прикладом 2, варто відзначити, що при обмеженні витрати сталевих фібри стає складніше досягати заданої міцності на розтяг при згині і, тому необхідно йти на перевитрату цементу і суперпластифікатора, що приводить до утворення суттєвого запасу по міцності при стиску – 89,7 МПа замість необхідних 70 МПа.

Запропонований метод розрахунку складу фібробетону дозволяє враховувати конкретні особливості досліджуваних матеріалів і досить легко оптимізувати склад за заданим критерієм, наприклад критерієм мінімальної

вартості. Також до переваг методу варто віднести можливість задавання довільної кількості обмежень (6.8), що дозволяє одночасно забезпечувати значну кількість показників якості, які можуть бути як не більшими, так і не меншими заданого значення.

6.2. Дослідно-промисловий випуск виробів на основі високоміцних фібробетонів

Для визначення фізико-механічних властивостей бетонних сумішей, а також властивостей високоміцних фібробетонів виготовлених згідно рекомендацій та за рецептурою, розробленою на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування було виконано дослідно-промисловий випуск залізобетонних виробів марки С 90.30.9,1 (палі забивні) згідно ДСТУ Б В.2.6-65:2008 [174] у виробничо-технічних умовах підприємства ПАТ "Рембуд" (м. Рівне), а також двох партій бетонних сумішей для виготовлення високоміцних бетонів та сталеві фібробетонів у виробничо-технічних умовах підприємства ППФ "Торгбуд сервіс".

Для виготовлення бетонних сумішей використані наступні сировинні матеріали:

- портландцемент ПЦ І-500 та ПЦ ІІ/А-Ш-500 за ДСТУ Б В.2.7-46:2010, виробництва ПАТ "Волинь-Цемент";
- суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux 2651 F. Виробник BASF Constraction Polymers, Тростберг, Німеччина,
- пісок середньої крупності ($M_{кр} = 1,95...2,15$) з родовищ Славутського району Хмельницької обл.,
- щебінь гранітний фракцій 2-5 мм, 5-20 мм та 20-40 мм Вирівського кар'єру Рівненської області.
- прискорювач твердіння - «Релаксол» антифриз FS, виробник ЛТД, ТОВ Будіндустрія, Україна.

- фібра сталева хвилеподібна довжиною 60 мм, діаметром 1 мм (Ф60/1), згідно EN 14889-1, ТУ У В.2.7-28.7-00191046-015:2007 [21].
- фібра базальтова РБР-18-т10 ТзОВ "Технобазальт-Інвест" (м.Київ) довжиною 12 мм, виготовлену із базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009.

Основні характеристики використаної фібри наведені в табл. 2.4-2.5.

Всі бетонні суміші були виготовлені в змішувачах примусової дії. Дозування матеріалів виконувалося з точністю для цементу, води і добавок до 1%, для заповнювачів - з точністю до 2%. Рухомість бетонної суміші у всіх випадках складала 18...20 см, що відповідає марці за консистенцією S4 (P4).

Палі С 90.30-9/1 (рис. 3.63) були виготовлені згідно ДСТУ Б В.2.6-65:2008. «Палі залізобетонні. Технічні умови». Палі забивні одиничні типу «С» виготовлялися суцільного квадратного перерізу з поперечним армуванням стовбура з робочої арматури та ненапружених стрижнів із сталі класу А400С, А500С по ДСТУ-3760:2006 [175]. Характеристика палі та її зовнішній вигляд наведені в табл. 6.2 та на рис. 6.3-6.4 відповідно.

Таблиця 6.2 – Характеристики палі С 90.30.9,1

Марка виробу	Довжина L, мм	a, мм	Клас бетону (марка бетону)
С 90.30.9,1	9000	250	С35 (М 450)
Об'єм бетону, м ³	Маса виробу, т	Морозостійкість	Водонепроникність
0,82	2,05	не нижче F50	не нижче W2

Формування палей здійснювалось у металевих формах. Ущільнення бетонної суміші проводилося шляхом вібрування за допомогою глибинних вібраторів.

Склади пропонованих бетонних сумішей наведений у табл. 6.3.

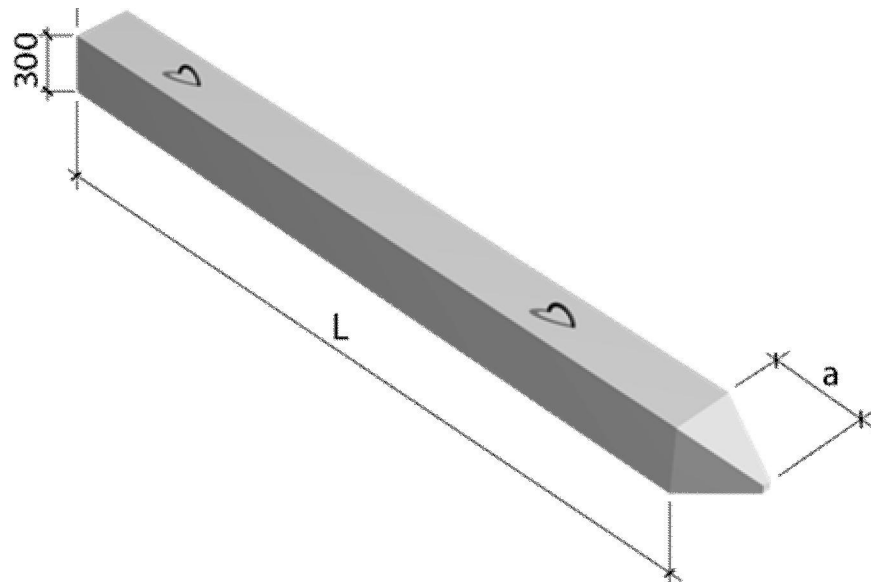


Рисунок 6.3 – Палі забивна С 90.30-9/1

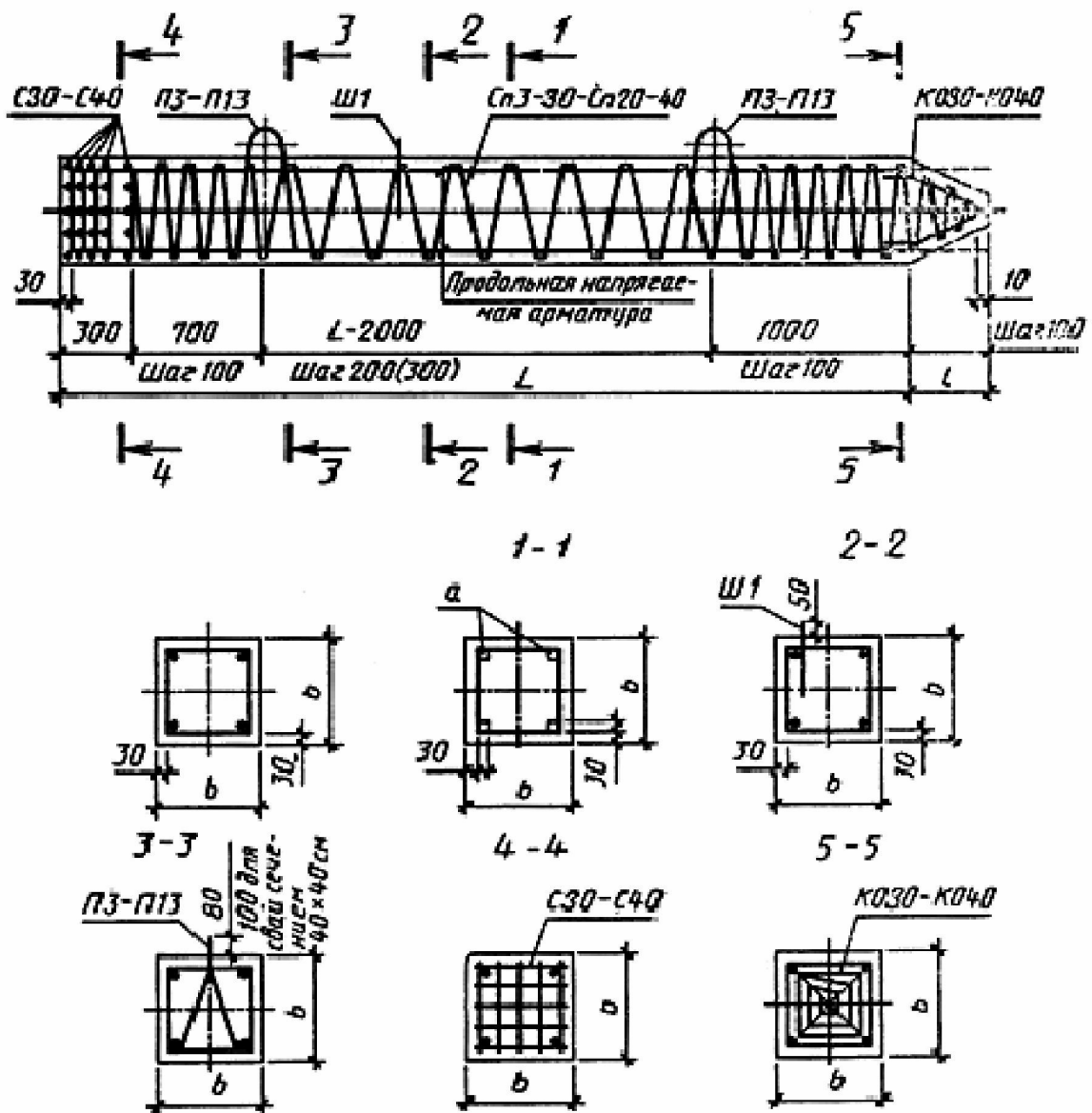


Рисунок 6.4 – Схема армування палі забивної С 90.30.9,1



Рисунок 6.5 – Палі забивні С 90.30.9,1 виготовлені на основі запропонованих складів фібробетонних сумішей у виробничих умовах ПАТ "Рембуд" (м. Рівне)



Рисунок 6.6 – Бетонозмішувальний вузол ППФ "Торгбуд сервіс"

Таблиця 6.3 – Склад запропонованих бетонних сумішей для високоміцних бетонів та фібробетонів

№	Компоненти	Паля С 90.30.9,1 кг/м ³	Важкий фібробетон, кг/м ³	Дрібно- зернис- тий фібро- бетон, кг/м ³	Важкий бетон, кг/м ³	Дрібнозе- рний бетон, кг/м ³
1	Цемент ПЦ І-500	-	500	500	500	500
2	Цемент ПЦ ІІ/А-Ш-500	440	-	-	-	-
3	Вода	110	125	150	125	150
4	Щебінь фракції 2-5 мм	-	-	1023	-	1023
5	Щебінь фракції 5-20 мм	520	1252	-	1252	-
6	Щебінь фракції 20-40 мм	760	-	-	-	-
7	Пісок	630	655	837	655	837
8	Суперплас- тифікатор Melflux 2651 F	2,2	2,5	2,5	2,5	2,5
9	Добавка антифриз FS	6,6	-	-	-	-
10	Фібра сталева Ф60/1	80	60	80	-	-
11	Фібра базальтова	4	-	4	-	-

Після виготовлення зразків були визначені їх нормативні показники якості за ДСТУ Б В.2.6-214:2009 [176]. Випробування проводилися в науково-дослідній

лабораторії будівельних матеріалів і виробів (свідоцтво про атестацію №РТ-0141/2015 від 23.12.2015 р.).

Результати випробувань наведені в табл. 6.4 свідчать про те що фактична міцність бетону, який виготовлений у виробничих умовах відповідає нормативному значенню згідно ДСТУ Б В.2.7-176:2008 [177].

Таблиця 6.4 – Результати випробувань запропонованих складів бетонних сумішей

№	Вид бетону	Рухомість бетонної суміші, см	Міцність, згідно ДСТУ Б В.2.7-176:2008, МПа	Міцність при стиску у віці діб, МПа			
				1	3	7	28
1	Паля С 90.30.9,1 С 70/85	20	85	44,0	56,1	75,3	89,0
2	Важкий бетон С 90/105	20	105	64,0	85,2	97,2	108,0
3	Дрібнозернистий бетон С 70/85	18	85	31,5	62,4	77,4	86,0
4	Важкий фібробетон С 90/105	18	105	69,0	88,4	100,4	108,8
5	Дрібнозернистий фібробетон С 70/85	16	85	39,1	65,3	79,4	87,4

Результати лабораторних досліджень підтверджені випуском дослідних партій бетонних сумішей для виготовлення високоміцних бетонів та фібробетонів. За результатами випробувань ППФ "Торгбуд сервіс" та ПАТ "Рембуд" прийняли запропоновані рецептури високоміцних бетонів та фібробетонів для впровадження у виробництво.

Матеріали розділу 6 опубліковано автором у працях [178-179].

Висновки до розділу

1. На основі отриманих експериментально-статистичних моделей міцності та витрати суперпластифікатора запропоновано методики проектування складів фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням, які дозволяють отримувати розрахункові значення витрат компонентів сумішей, необхідних для забезпечення нормованого комплексу їх будівельно-технічних властивостей.

Розроблені методики дозволяють враховувати конкретні особливості досліджуваних матеріалів і оптимізувати склад за довільним критерієм, наприклад критерієм мінімальної вартості фібробетону.

2. За результатами проведених досліджень були запропоновані склади фібробетонних сумішей, в т.ч. з композиційним дисперсним армуванням, що були успішно апробовані на практиці. Дослідно-промислову партію палів забивних випущено у виробничо-технічних умовах підприємства ПАТ "Рембуд" (м. Рівне), а також дві партії бетонних сумішей для виготовлення високоміцних бетонів та фібробетонів у виробничо-технічних умовах підприємства ППФ "Торгбуд сервіс".

3. Основні положення дисертаційної роботи та результати експериментальних досліджень, зокрема методики розрахунку складів фібробетонів, використовуються в навчальному процесі Національного університету водного господарства та природокористування при викладанні дисциплін "Проектування складів бетонів та розчинів різних видів", "Аналіз будівельно-технологічних задач та методи їх оптимального рішення" для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (Додаток Г).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено наукове завдання з розробки технології високоміцного дрібнозернистого фібробетону із композиційним дисперсним армуванням. Внаслідок проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримані наступні теоретичні і практичні результати.

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість отримання ефективних полідисперсноармованих фібробетонів з використанням сталеві та базальтової фібри, що характеризуються високими експлуатаційними властивостями за рахунок підвищення однорідності структури фібробетонів і суттєвого зменшення розшарування фібробетонних сумішей. Показано, що при використанні сталеві хвилястої фібри в кількості $80 \dots 100 \text{ кг/м}^3$ та базальтової фібри в кількості $2 \dots 4 \text{ кг/м}^3$ стає можливим одержання фібробетонів з міцністю при стиску до 100 МПа та міцністю на розтяг при згині до 20 МПа.

2. Вивчено особливості впливу сталеві фібри з різними геометричними параметрами на міцнісні показники фібробетонів. Встановлено найбільшу ефективність застосування для важких та дрібнозернистих бетонів сталеві фібри хвилястого профілю, що має підвищену поверхню зчеплення з бетоном та характеризується більш рівномірним розподіленням в бетонній суміші. Показано, що застосування дрібнозернистого бетону на досліджуваних видах фібри дозволяє підвищити коефіцієнт ефективності дисперсного армування (співвідношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску) більше ніж у два рази у порівнянні з неармованими бетонами і на 20...25 % у порівнянні з крупнозернистими.

3. З використанням отриманих експериментально-статистичних моделей за умов забезпечення максимальних значень міцності на розтяг при згині встановлено оптимальний вміст сталеві фібри, який для фібробетонів з витратою цементу $450 \dots 550 \text{ кг/м}^3$ і при однаковій рухомості (15...20 см) складає 60 кг/м^3 ($\varphi = 0,76\%$) – для звичайного важкого бетону і 100 кг/м^3 ($\varphi = 1,27\%$) –

для дрібнозернистого бетону.

4. Підтверджено позитивний вплив орієнтації сталеві фібри в структурі фібробетону під дією магнітного поля. Даний ефект більш суттєво проявляється в міру збільшення рухомості бетонної суміші і дозволяє підвищити міцність на розтяг при згині дрібнозернистого сталеві фібробетону до 15 %. Встановлено посилення ефекту орієнтування фібри за рахунок введення добавок суперпластифікаторів, що призводить до збільшення тиксотропії в процесі вібрування.

5. На основі аналізу комплексу експериментально-статистичних моделей міцнісних параметрів фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням встановлено ефективність застосування базальтової фібри довжиною волокон 12 мм в оптимальних співвідношеннях із сталеві фіброю. Отримані кількісні залежності, що характеризують вплив водоцементного відношення, витрат цементу, вмісту сталеві та базальтової фібри на міцність композиційних фібробетонів при стиску та розтяг при згині а також їх співвідношення.

6. Експериментально встановлено, що для фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням, діє правило "постійності водопотреби", відповідно до якого при постійній рухомості бетонної суміші водопотреба залишається практично постійною при цементно-водних відношеннях менших деякого критичного значення ($C/V < C/V_{кр}$). Зону критичного C/V для досліджуваних фібробетонів зафіксовано в межах 2,2...2,3 а після введення суперпластифікаторів вона зміщується до значень $C/V_{кр} = 2,6...2,7$. Отримано експериментально-розрахункові залежності водопотреби фібробетонних сумішей, в т.ч. при використанні водоредукуючих добавок, в широкому діапазоні рухомості бетонних сумішей.

7. Експериментально підтверджено можливість уникнення або суттєвого зменшення розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування. Показано можливість суттєвого зменшення розшарування фібробетонної суміші з композиційним дисперсним армуванням у порівнянні із сталеві фібробетонною

сумішшю при однаковій тривалості віброущільнення, що може досягати 20% для сумішей з рухомістю Р3 і 35% з рухомістю Р4.

8. Показано ефективність композиційного дисперсного армування з погляду на покращення показників, що характеризують середній розмір пор та однорідність порового простору фібробетонів, особливо при введенні суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу.

Встановлено суттєве підвищення відношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску у випадку введення до складу фібробетону базальтової фібри. При порівнянні аналогічних складів сталеві фібробетонів та полідисперсноармованих фібробетонів відзначається зростання цього відношення для композиційного фібробетону на 10...25%.

9. В умовах динамічних навантажень найбільшою ударною міцністю відзначається композиційний фібробетон, з вмістом сталеві фібри 120 кг/м³ та базальтової фібри 4 кг/м³). Максимальний показник ударної міцності склав 31,8 Дж/см³ перевищуючи контрольне значення неармованого бетону більше ніж в 3,5 рази. Встановлено зростання ударної в'язкості фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням в 6...7 разів по відношенню до контрольного неармованого бетону в залежності від виду та вмісту армуючих елементів.

10. Запропоновано методику проектування складів фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням, що ґрунтується на використанні експериментально-статистичних моделей параметрів якості та складу фібробетонів і дозволяє отримувати розрахункові значення витрат компонентів сумішей, необхідних для забезпечення нормованого комплексу їх будівельно-технічних властивостей при забезпеченні мінімальної сумарної вартості.

На ПАТ "Рембуд" (м. Рівне) випущено дослідно-промислово партію палів забивних з використанням фібробетону із композиційним дисперсним армуванням, що характеризуються високими фізико-механічними характеристиками. За результатами випуску партій бетонних сумішей для виготовлення високоміцних бетонів та фібробетонів у виробничо-технічних умовах підприємства ППФ "Торгбуд сервіс" розроблені склади були прийняті для впровадження у виробництво.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Некрасов В. П. Метод косвенного вооружения бетона / В. П. Некрасов. – М.: Транспечать, 1925. – 255 с.
2. Фибробетон в Японии. Экспресс-информация. Строительные конструкции". – М, ВНИИИС Госстроя СССР, 1983. – 26 с.
3. ВСП 56–97 "Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций". – М., 1997.
4. Сталефибробетон и конструкции из него. Серия "Строительные материалы" Вып. 7 ВНИИНТПИ. – М., 1990.
5. Хун Д.Л. Свойства бетонов, содержащих микрокремнезём и углеродное волокно, обработанное силанами / Д.Л. Хун // Экспресс-информация. Вып. №1, 2001. – С.33–37.
6. Schmidt M. Ultrahochfester Beton–und Fertigteiltechnik / M. Schmidt, E. Fenling. – 2003. – Н .11, Р.16–19.
7. Magumdar A. Glass fiber reinforced cement / A. Magumdar. – London, 1991.
8. Сычева Л.И. Материалы, армированные волокном / Л.И. Сычева, А.В. Воловика. Перевод изд.: Fibrereinforced materials. – М.: Стройиздат, 1982. – 180 с.
9. Рабинович Ф.Н. Дисперсно армированные бетоны / Ф.Н. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1989. – 174 с.
10. Рабинович Ф.Н. Применение фиброармированных бетонов в конструкциях промзданий / Ф.Н. Рабинович // Фибробетон и его применение в строительстве: Труды НИИЖБ. – М., 1979. – С. 27–38.
11. Романов В.Л. Влияние параметров дисперсного армирования на прочность элементов из сталефибробетона при статических и динамических нагрузках / В.Л. Романов, Ф.Н. Рабинович, И.Д. Захаров // Исследование и расчет новых типов пространственных конструкций гражданских зданий: Труды ЛенЗНИИЭП. – Л., 1985. – С. 88–94.

12. Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. - ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016. - [Чинний від 2017-04-01]. - К. : ДП "УкрНДНЦ", 2017. -109 с. (Національний стандарт України).
13. Заключение о результатах сравнительных испытаний образцов тяжелого бетона и фибробетона, где в качестве фибры использованы волокна армирующие полипропиленовые производства ООО "ДИиФ". – Донецк: Донецкий ПромстройНИИпроект, 2004.
14. Рахимов Р.З. Фибробетон – строительный материал XXI века. / Р.З. Рахимов // Бетон и сухие строительные смеси. № 254, 2008.
15. Експертний висновок про можливість використання поліпропіленової фібри виробництва ТОВ "СПЕЦНАБ" у дорожньому будівництві. – К.: ДерждорНДІ, 2007.
16. К вопросу оценки трещиностойкости высокопрочного фибробетона с полиамидными волокнами / [Демьянова В.С., Макридин Р.И., Михеенко Е.Ю., Мишин А.С.]. Изв. вузов. Строительство. – 2004. – № 3. – С. 27–31.
17. Волков И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве / И.В. Волков // Строительные материалы – 2004. – №6. – С.13-15.
18. Рабинович Ф.Н. Бетоны, дисперсноармированные волокнами: Обзор ВПИИЭСМ / Ф.Н. Рабинович. – М., 1976. – 73 с.
19. Холистер Г.С. Материалы упрочненные волокнами. Пер. с англ. / Г.С. Холистер, К. Томас; под ред. В.С. Ивановой. – М.: Металлургия, 1969. – 167 с.
20. Рабинович Ф.Н. Монолитные днища резервуаров из сталефибробетона / Ф.Н. Рабинович, А.П. Черномаз, Л.Г. Курбатов // Бетон и железобетон. – 1981. – №10. – С.24–25.
21. BS EN 14889-1:2006 – Фібра для бетонів. Стальна фібра. Позначення, специфікація, конфігурація.

22. ASTM C116-90. Test Method for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure (Withdrawn 1999), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1990.
23. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – К.: Основа, 2007. – 616 с.
24. Баженов Ю.М. Модифицированные высокопрочные бетоны / Ю.М. Баженов, О.О. Демьянова, В. И. Калашников. – М.: Издательство Ассоциация строительных вузов, 2006. – 368 с.
25. Рамачандран В. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн // Пер. с англ. под ред. В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
26. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.
27. Пухаренко Ю.В. Реставрация и строительство: потенциал фиброармированных материалов и изделий / Ю.В. Пухаренко // Современные проблемы науки и образования, 2012. – № 4. – С. 45.
28. Боровских И.В. Оптимизация гранулометрического состава песка для получения высокопрочного тонкозернистого бетона / И.В. Боровских, Н.М. Морозов, В.Г. Хозин // Известия КазГАСУ, 2008. – №2. – С. 121–125.
29. Моргун Л.В. Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения: автореф. дисс. ... доктора техн. наук / Моргун Любовь Васильевна. – Ростов-на-Дону, 2005. – 48 с.
30. Моргун Л.В. Особенности структуры и свойства безавтоклавных ячеистых бетонов, армированных синтетическими волокнами / Л.В. Моргун, И.А. Лобанов, Ю.В. Пухаренко // Бетон и железобетон. – 1983. – № 9. – С. 12–14.
31. Моргун В.Н. Влияние вида дисперсной арматуры на свойства пенобетонов / В.Н. Моргун, Б.В. Талпа // Строительные материалы. – 2008. – № 6. – С. 48.
32. Моргун, Л.В. Влияние дисперсного армирования на агрегативную устойчивость пенобетонных смесей / Л.В. Моргун, В.Н. Моргун // Строительные материалы. – 2003. – № 1. – С. 33–35.

33. Дулеба М.Т. Синтез и исследование стекол, устойчивых в среде твердеющего портландцемента: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Дулеба М.Т. – Киев: КПИ. – 1973. – 20 с.
34. Пащенко А.А. Армирование цементного камня минеральным волокном / А.А. Пащенко, В.П. Сербин. – Киев. – 1973. – 20 с.
35. Рабинович Ф.Н., Устойчивость стеклянных волокон к воздействиям среды гидратирующихся цементов. / Ф.Н. Рабинович, Н.Д. Клишанис // Неорганические материалы: Изд. Академии наук СССР. – 1982. – № 2. – Т. 18. – С. 323 – 329.
36. Зотов А.М. Исследование прочностных свойств мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй для дорожного строительства / А.М. Зотов // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – №8. – С. 42–46.
37. Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном / [Клюев А.В., Клюев С.В., Дураченко А.В., Нетребенко А.В.]. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – №4. – 2014. – С. 67–72.
38. Клюев С.В. Мелкозернистый фибробетон с использованием полипропиленового волокна для покрытия автомобильных дорог / С.В. Клюев, Е.Н. Авилова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – №1. – 2013. – С. 37–40.
39. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография / Ф.Н. Рабинович. – М.: Издательство АСВ, – 2004. – 201 с.
40. Морозов Н.М. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / Н.М. Морозов, Ю.В. Пухаренко // Вестник МГСУ. – М., – 2014. – № 3 – С. 189–196.
41. Пухаренко Ю.В., Лезов В.Ю. Оптимизация параметров армирования мелкозернистого бетона синтетическими волокнами / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Лезов // Интенсификация технологических процессов в производстве

- сборного железобетона: Межвуз. темат. сб. трудов – Л.: ЛИСИ, – 1988. – С. 24–27.
42. Kelly A. Interface Effects and the Work of Fracture of a Fibrous Composite / A. Kelly // Proceedings of the Royal Society of London, Series A 319 95-116. – 1970.
 43. Barr B. The fracture characteristics of FRC materials in shear. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP–105. American Concrete Institute, Detroit, S. 27/53, 1987.
 44. Houde J., Prezeau A., Roux R. Creep of concrete containing fibers and silica fume. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP–105, American Concrete Institute, Detroit, S. 101/118, 1987.
 45. Свойства дорожных бетонов с полимерной фиброй / [Толмачев С.Н., Кондратьева И.Г., Маракина Л.Д., Матяш А.В., Солдатенко С.Е.]. Науковий вісник будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. – 2008. – Вип. 48. – С. 150–154.
 46. Материалы, армированные волокнами. Пер. с англ. Л. И. Сычевой, А. В. Воловика / М. : Стройиздат, 1982. – 180 с.
 47. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах / [Дворкін Л.Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В.]. – К.: Вид-во КНУБА, – 2007. – 216 с.
 48. Ставров Г.Н. Влияние фибрового армирования на прочность бетона при динамических нагружениях / Г. Н. Ставров, В. П. Романов, И. Д. Захаров // Технология изготовления и свойства новых композиционных строительных материалов: Межвуз. темат. сб. трудов – Л., – 1986. – С. 49–57.
 49. Боровских И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. / Боровских Игорь Викторович. – Казань, – 2009. – 21с.
 50. Степанова В.Ф. Цементные композиции, армированные базальтовым волокном / В.Ф. Степанова, А.В. Бучкин // Технологии бетонов. – 2007. – №5. – С. 28–29.

51. Боровских И.В. Изменение длины базальтовых волокон при получении композиционного вяжущего для высокопрочных базальтофибробетонов / И.В. Боровских, В.Г. Хозин // Известия КазГАСУ. – 2009. – №2. – С. 234–238.
52. Боровских И.В. Исследование влияния способов введения базальтового короткорубленного волокна на прочностные характеристики мелкозернистого бетона / И.В. Боровских, В.Г. Хозин // Строительный комплекс России: Наука, образование, практика: Материалы Международной научно-практической конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, – 2008. – С. 27–31.
53. Степанова В.Ф. Коррозионное поведение базальтового волокна в цементной матрице бетона / В.Ф. Степанова, А.В. Бучкин // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2011. – № 9. – С. 22–26.
54. Бабаев В.Б. Базальтовое волокно как компонент для микроармирования цементных композитов / В.Б. Бабаев, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, – 2012. – № 4. – С. 58–61.
55. Бабаев В.Б. Мелкозернистый цементобетон с использованием базальтового волокна для дорожного строительства: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Бабаев Виктор Борисович. – Белгород, 2013. – 22 с.
56. Бучкин А. В. Мелкозернистый бетон высокой коррозионной стойкости, армированный тонким базальтовым волокном: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Бучкин Андрей Викторович. – М., – 2011. – 20 с.
57. Рабинович Ф.Н. Устойчивость базальтовых волокон в среде гидратирующихся цементов / Ф.Н. Рабинович, В.Н. Зуева, Л.В. Макеева // Стекло и керамика. – 2001. – №12. – С. 29–32.
58. Рабинович Ф.П. Прогнозирование изменений во времени прочности стеклофиброцементных композитов / Ф.П. Рабинович // Стекло и керамика. – 2003. – №2 – С. 32–38.

59. Самоущільнювальні бетони зі швидким наростанням міцності / [Кіракевич І.І., Марущак У.Д., Саницький М.А., Стечишин М.С.]. Теорія і практика будівництва : Вісник НУЛП. – Львів, 2012. – № 737. – С. 153–158.
60. Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами / [Пащенко А.А., Сербин В.П., Паслаская А.П. и др.]. – М.: Стройиздат, 1988. – 201с.
61. Свойства волокон и бетона, армированного волокнами. Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М. – 1974. – Вып.14. – С. 12–15. – Сер.7. (Строительные изделия и конструкции).
62. Григорьев В.И. Напряженно-деформированное состояние сталефибро-железобетонных изгибаемых элементов при импульсном воздействии: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.И. Григорьев. Ленингр. инженер.-строит. ин-т. – Л., 1987. – 24 с.
63. Прочность на излом бетона, армированного волокнами. Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М. – 1980. – Вып. 10. – С. 4–6.
64. Аболины, Д.С. Соппротивление фибробетона изгибу и растяжению / Д.С. Аболины, В.К. Кравинскис // Расчет и оптимизация строительных конструкций. – Рига, 1974. – С. 47–54.
65. Павленко, В.И. Свойства фибробетона и перспективы его применения: аналит. обзор. / В.И. Павленко, В.Б. Арончик // Латв. Респ. ин-т науч.-техн. информ. и пропаганды. – Рига, 1978. – 96 с.
66. Рыбасов, В.П. Исследование свойств бетона, армированного стальными волокнами / В.П. Рыбасов // Новые материалы и изделия в строительстве. – М., 1982. – С. 36–38.
67. Курбатов Л.Г. Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами / Л.Г. Курбатов, Ф.Н. Рабинович // Бетон и железобетон. – 1980. – №3. – С. 6–8.
68. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов / Ю.П. Горлов, А.П., Меркин, А.А. Устенко // М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.

69. Воробьев Х.С. Дисперсно-армированный ячеистый бетон / Х.С. Воробьев, В.Г. Бортников, С.Г. Данилова // – Рига, ЛатИНТИ, 1975. – С.39–43.
70. Курбатов Л.Г. Опыт применения сталефибробетона в инженерных сооружениях / Л.Г. Курбатов, М.Я. Хазанов, А.Н. Шустов // – Л.: ЛДНТП, 1982. – 28с.
71. Бурангулов Р.И. Забивные сваи повышенной ударостойкости из бетона с фибровым армированием / Р.И. Бурангулов, З.Б. Мишелова, Н.Ш. Юлдашев // – М.: ЦБНТИ. Строительство в районах Урала и Зап.Сибири СССР. Серия: Совершенствование базы строительства, 1987, – вып.1. – С.36–38.
72. Копытин В.П. Ударная вязкость дисперсно-армированного бетона / Дисперсно–армированные бетоны и конструкции из них // – Рига: ЛатИНТИ, 1975. – С. 86–90.
73. Лобанов И.А. Ударостойкость фибробетонов, армированных низкомодульными синтетическими волокнами / И.А. Лобанов, Ю.В. Пухаренко, Ю.А. Гурашкин // Технология и долговечность дисперсно-армированных бетонов / – Л.: НИИЭП, 1984. – С. 92–96.
74. FibrousConcrete in the USA and UK. "Precast Concrete", 1972. – № 10. – P. 613–616.
75. Родов Г.С. Опыт применения стальных фибр диаметром 2мм и фибр из отработанных тросов для производства забивных свай / Г.С. Родов, Б.В. Лейкин, В.С. Стерин // Экспресс-информ. ЦБНТИ. Строит. в районах Урала и Зап. Сибири СССР. Серия: Совершенствование базы строительства, 1987/ – вып.1. – С. 31–33.
76. Воронцов М.П. Резервы экономии материальных и энергетических ресурсов на предприятиях сборного железобетона / М.П. Воронцов, Пак, Ю.В. Пухаренко // – Л., 1986. – 28 с.
77. Бетон, армированный волокнами // Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М., 1975. – Вып.22. – С. 13–14. – Сер.7. (Строительные материалы и изделия).

78. Пухаренко Ю.В. Высокопрочный сталефибробетон / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – №9. – С. 40–41.
79. Пухаренко Ю.В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: дис. ... докт. техн. наук / Пухаренко Юрий Владимирович. СПбГАСУ. – СПб, 2005. – 315 с.
80. Влияние некоторых характеристик отрезков стальной проволоки на свойства бетона, армированного этими отрезками. Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М., 1974. – Вып.17. – С 6–8.
81. Голубев В.Ю. О методах определения вязкости разрушения высокопрочного бетона / В.Ю. Голубев // Доклады 65-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных руководителей, инженеров и аспирантов университета. Ч.1. – СПб: СПбГАСУ, 2008. – С. 205–207.
82. Пухаренко Ю.В. О вязкости разрушения фибробетона / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев // Вестник гражданских инженеров. – 2008. – №3(16). – С. 80–83.
83. Пухаренко Ю.В. Проектирование состава и исследование свойств высокопрочного сталефибробетона / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова, В.Ю. Голубев // III третья международная выставка-конференция "Популярное бетоноведение 2009": – сб. докл., 2009. – С. 74–79.
84. Растяжимость и начало образования трещин в бетоне, армированном отрезками стальной проволоки. Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М. – 1975. – Вып.9. – С. 9–12.
85. Романов В.П. К вопросу о пределе трещиностойкости фибробетона на растяжение / В.П. Романов // Исследование новых типов пространственных конструкций гражданских зданий и сооружений. – Л., 1977. – С. 96–105.
86. Ставров Г.Н. Состояние и перспективы применения сталефибробетона в конструкциях, подверженных динамическим воздействиям / Г.Н. Ставров, В.П. Романов, И.Д. Захаров // Применение сталефибробетона в строительстве. – Л., 1985. – С. 55–58.

87. Курбатов Л.Г. Трещиностойкость и раскрытие трещин в изгибаемых сталефибробетонных элементах / Л.Г. Курбатов, В.Н. Попов // Пространственные конструкции в гражданском строительстве. – Л., 1982. – С. 33–42.
88. Рабинович Ф.Н. О пределе трещиностойкости мелкозернистого бетона, армированного стальными фибрами / Ф.Н. Рабинович, В.П. Романов // Механика композиционных материалов. – 1985. – №2. – С. 277–283.
89. Ковалева А.Ю. Формирование макроструктуры сталефибробетонов (на примере токарной фибры): дис. ... канд. техн. наук / Ковалева Анна Юрьевна. СПбГАСУ. – СПб, 2001.
90. Гулимова Е.В. Исследование коррозионной стойкости арматуры в сталефибробетоне: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Гулимова. Ленингр. инженер.-строит. ин-т. – Л., 1980. – 23 с.
91. Лобанов И.А. Основы технологии дисперсно-армированных бетонов (фибробетонов): дис. ... докт. техн. наук / И.А. Лобанов. Ленингр. инженер.-строит. ин-т. – Л., 1982. – 384 с.
92. Серенко А.Ф. Дисперсно-армированные бетоны высокой морозостойкости с добавками ПАВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Ф. Серенко. Ленингр. ин-т инженеров ж.-д. транспорта. – Л., 1989. – 23 с.
93. Кобацкий А.В. Влияние диаметра фибровой арматуры на ее коррозионную стойкость / А.В. Кобацкий, В.М. Ефремова // Исследования тонкостенных пространственных конструкций и технология их изготовления. – Л.: 1980. – С. 112–116.
94. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона / Н.П. Блещик // – Минск: Наука и техника, 1977. – 232 с.
95. Тупицина В.Н. Исследование дисперсно-армированного бетона и железобетона в условиях многократного замораживания до температуры -50°C : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Тупицина. Ленингр. инженер.-строит. ин-т. – Л., 1982. – 22 с.

96. К вопросу применения нескольких видов фибр для дисперсно армированных бетонов / [Клюев С.В., Лесовик Р.В., Клюев А.В., Бондаренко Д.О.]. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – № 94. – 2012. – С. 81–83.
97. Пухаренко Ю.В. Полидисперсное армирование строительных композитов – фибробетонов / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова // Технологии бетонов. 2011, №1–2. – С. 28–29.
98. Голанцев В.А. Свойства и особенности полиармированных фибробетонов: дис. ... канд. техн. наук / В. А. Голанцев. – Л., 1990. – 214 с.
99. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсноармованих цементуючих систем / [Саницький М. А., Марущак У. Д., Кіракевич І. І., Стечишин М. С.]. Будівельні матеріали і вироби, 2015. – № 1. – С. 6–9.
100. Кайсер Л.А. Цементы и их рациональное использование при производстве сборных железобетонных изделий / Л.А. Кайсер, Р.С. Чехова. – М.: – Стройиздат, 1972. – 80 с.
101. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. / В.Г. Батраков // Теория и практика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с.
102. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. – М., НИИЖБ СССР. – 1982, – 103 с.
103. Баженов Ю.М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона / Ю.М. Баженов, В.А. Вознесенский. – Москва: Стройиздат, 1974. – 192 с.
104. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – Москва: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
105. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011. – 174 с.
106. Дворкін Л.Й. Випробування бетонів і розчинів. Проектування їх складів. / Л.Й. Дворкін, В.І. Гоц, О.Л. Дворкін // Навчальний посібник. – 2014. – 397 с.

107. Дорф В.А. Влияние содержания и характеристик фибры на коэффициент истираемости сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей / В.А. Дорф, Р.О. Красновский // Технологии бетонов. – 2013. – №12. – С. 40–42.
108. Ключев С.В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – №8. – С. 61–66.
109. Баженов, Ю.М. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Материалы I Всероссийской конференции по бетону и железобетону. – М., 2001. – С. 91–101.
110. Курбатов Л.Г. Некоторые вопросы проектирования и экономики конструкций, армированных стальными фибрами / Л.Г. Курбатов, В.П. Романов // в кн.: Фибробетон и его применение в строительстве. // сб. научн. тр. – М.: НИИЖБ, 1979. –173 с.
111. Обухов А.Н. Сталефибробетон роликового прессования с применением напрягающего цемента : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Обухов А.Н. – М., 1988. – 23 с.
112. Беленький В.Н. Роторно-ударная технология приготовления фибробетонной смеси. / В.Н. Беленький // в кн. Дисперсно-армированные бетоны и конструкции из них. – Рига: ЛАГИНТИ, 1975. – 141 с.
113. Курбатов Л.Г. Экспериментальные конструкции из бетона, армированного стальными фибрами / Л.Г. Курбатов // в кн.: Фибробетон и его применение в строительстве. //сб. научн. тр. – М.: НИИЖБ, 1979. –173 с.
114. Копанский Г.В. Структура армирования сталефибробетона и ее технологическое обеспечение: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Копанский Г.В. – Л., 1985. – 23 с.
115. Коротышевский О.В. Использование метода раздельной укладки при изготовлении изделий из сталефибробетона. / О.В. Коротышевский // в кн. Фибробетон и его применение в строительстве. – М.: НИИЖБ, 1979. –173 с.
116. А.С. СССР № 1694555. Шабловский Е.А., Снятков СВ. Способ приготовления фибробетонной смеси. – опубл. 30.11.91.

117. Патент № 1673446 SU. Дрожнер И.М. и др. Способ изготовления бетонных изделий. – опубл. 30.08.91.
118. Патент № 1660966 SU. Андреев И.А. и др. Способ изготовления фибробетонных изделий. – опубл. 07.07.91.
119. Шакиров С.Ю. Дисперсно армированный бетон в электромагнитном поле / С.Ю. Шакиров, Д.В. Шарипов // "Строительство и архитектура Узбекистана", 1979. – № 7. – С.14–15.
120. А.С. СССР № 476989 МКИ В28В 1/52 Способ изготовления фиброармированных бетонных изделий./ Беспалов В.В. – опубл. 10.10.75.
121. Матус Е.П. Воздействие магнитного поля на структуру и свойства цементно-песчаного сталефибробетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 "Строительные материалы и изделия"/ Матус Евгений Петрович. Новосибирский архитектурно-строительный университет. – Новосибирск, 2000. – 20 с.
122. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Є.М. Бабич, В.В. Житковський, О.М. Бордюженко, С.В. Філіпчук, Д.В. Кочкар'юв, І.В. Ковалик, Т.В. Ковальчук, М.М. Скрипник // Рівне: НУВГП. – 2017. – 331 с.
123. Дворкін Л.Й. Вплив виду сталеві фібри на міцнісні властивості сталефібробетонів / О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Строительные материалы и изделия. – 2017. – №1-2 (94). – С. 25-29.
124. Ефективність бетонів на вітчизняному суперпластифікаторі / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, М.М. Скрипник, Т.В. Ковальчук. // Будівництво України. – 2017. – №4. – С. 10-13.
125. Дворкін Л.Й. Вплив орієнтації сталеві фібри на механічні характеристики фібробетону / Л.Й. Дворкін, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Матеріали 6-ї міжнародної науково-практичної конференції "Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві". – Харків, 2016. – С 31-32.

126. Пат. 111661 Україна МПК В28В 1/52. Спосіб отримання бетону дисперсно-армованого орієнтованою сталлюю фібрую / Л.Й. Дворкін, Є.М. Бабич, О.М. Бордюженко, В.В. Житковський, Т.В. Ковальчук // Заявник та патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u201603075; заявл. 25.03.2016; опубл. 25.11.2016; Бюл. № 22. – 4 с.
127. Волков, И.В. Сталефібробетонные конструкции зданий и сооружений / И.В. Волков, В.А. Беяева // Обзорная информация. М.: ВНИИТПИ. – 1990. – 59 с.
128. DBV-Merkblatt. Stalfaserbeton. – DeutscherBeton - und Bautechnik-Verein. – 2001. – 77 s.
129. Дворкін Л.Й. Проектування складів бетону / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін. – Рівне: НУВГП, 2015. – 353 с.
130. СТО НОСТРОЙ 2.27.125–2013. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ. – Москва. – 2012. – 117 с.
131. Дворкін Л.Й. Оптимізація складу високоміцного сталефібробетону / Л.Й. Дворкін, Т.В. Ковальчук // Строительные материалы и изделия. – 2016. – №2-3 (92). – С. 38-41.
132. Ковальчук Т.В. Дослідження водопотреби фібробетонних сумішей з використанням суперпластифікаторів / Т.В.Ковальчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП. – 2017. – Вип. 34. – С. 18-26.
133. Дворкин Л.И. Технологические особенности фибробетонных смесей с использованием суперпластификаторов / Л.И. Дворкин, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Технологии бетонов. – Москва, 2018. – № 5-6. – С. 36-40.
134. Шейкин А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / А. Е. Шейкин. – М.: Стройиздат, 1974. – 192 с.
135. Дворкин Л.И. Основы бетоноведения / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – С.Пб: СтройБетон. – 2006. – 692 с.

136. Powers T.C. Studies and physical properties of hardened Portland cement paste / T.C. Powers, T.L. Brownyard. – Proc. Amer. Concrete Inst., 1947, – №43.
137. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / Батраков В.Г. – М.: 1992. – вып.2.
138. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete // Concrete Society Technical Report. – 2007. – pp. 92.
139. Ахмеднабиев Р.М. Влияние различных волокон на свойства фибробетонов / Р.М. Ахмеднабиев, А.М, Калимов, Н.Ю. Кравчук // XXII Международная заочная научно-практическая конференция "Технические науки – от теории к практике". – 2013. – С. 54– 58.
140. Геометрические параметры фибры для высокопрочных бетонов / [Калашников В.И., Скачков Ю.П., Ананьев С.В., Троянов И.Ю.]. Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №1. – С. 27–33.
141. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона / [Карпенко Н.И., Травуш В.И., Каприелов С.С., Мишина А.В., Андрианов А.А., Безгодков И.М.]. – Архитектура и строительство. – 2011. – №1. – С. 106–113.
142. Лысенко Е.Ф. Исследование физико-механических свойств сталефибробетона растянутой зоны изгибаемых элементов / Е.Ф. Лысенко, Г.В. Гетун // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – № 9. – С. 26–29.
143. Мишина А.В. Влияние возраста высокопрочного сталефибробетона на его физико-механические и реологические свойства: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Мишина Александра Васильевна. – М.: – 2013. – 22 с.
144. Мишина А.В. Изменение физико-механических характеристик высокопрочных сталефибробетонов во времени / А.В. Мишина. Строительство и реконструкция. – № 6(38). – 2011. – С. 70–74.
145. Мишина А.В. Физико-технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона / А.В. Мишина, И.М. Безгодков, А.А. Андрианов // Вестник МГСУ. – 2011. – Т.2. – №3.– С.159–165.

146. Свиридов Н.В. Бетон с прочностью 150 МПа на рядовых портландцементях / Н.В. Свиридов, Б.Г. Коваленко // Бетон и железобетон. – 1990. – №2. – С.21–22.
147. Свиридов Н.В. Механические свойства особо прочного цементного камня / Н.В. Свиридов, Б.Г. Коваленко, В.М. Чесноков // Бетон и железобетон. – 1991. – №2. – С. 7–9.
148. Черноусов Н.Н. Изгибаемые сталефиброшлакобетонные элементы / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов // Бетон и железобетон. – 2010. – №4. – С.7–11.
149. Precast thin UHPFRC curved shells in a waste water treatment plant / [Delplace Gilles, Hajar Ziad, Simon Alain, Cliaut Sandriue, Weizmaun Luc]. RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. – France. – Marseille. – 2013. – pp. 49–58.
150. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading/ H. Kolsky// Proc. Phys. Soc. (London). – 1949. Vol. 62B. – pp. 676–700.
151. Naaman A. E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement composites / A.E. Naaman // Journal of advanced concrete technology. – 2003. – №1. – pp. 241–252.
152. Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete Structures, by Concrete Committee of Japan Society of Civil Engineers (JSCE). – 2006.
153. Капустин Д.Е. Прочностные и деформационные характеристики несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук / Д.Е. Капустин. – Москва, – 2015.
154. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1970, – 274 с.
155. Ламзин Д.А. Высокоскоростное деформирование и разрушение мелкозернистых бетонов: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. / Ламзин Д.А. – Нижний-Новгород, 2014. – 161 с.

156. Аветисян Л. А. Прочность и деформативность сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий: дис.... канд. техн. наук: 05.23.01. / Аветисян Левон Аветисович. – Москва, 2015. – 215 с.
157. Казаков Ю.Н. Инженерные решения для строительства "антитеррористических" зданий / Ю. Н. Казаков, Н. Флавицкий, Т. М. Николаева // Монография. – СПб.: СПГАСУ, 2009. – 472 с.
158. EN 14488-5:2006 Testing sprayed concrete. Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens.
159. EN 14651:2005+A1:2007 Test method for metallic fiber concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).
160. EN 14845-2:2006 Test methods for fibers in concrete. Effect on concrete.
161. Дворкін Л.Й. Вплив дисперсного армування на властивості бетону виготовленого на малоклінкерному шлакопортландцементі / Л.Й. Дворкін, Ю.О. Степасюк, Т.В. Ковальчук // Сб. трудов XIII Международной научно-практической конференции "Состояние современной строительной науки-2015". – Полтава, 2015. – С. 51-55.
162. Дворкін Л.Й. Ефективність дисперсного армування високоміцного дрібнозернистого бетону / Л.Й. Дворкін, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті". – Харків, 2017. – С. 81-83.
163. Ахвердов И. Н. Теоретические основы бетоноведения / И. Н. Ахвердов. – Мн.: Вища школа, 1991. – 188 с.
164. Баженов Ю. М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона / Ю. М. Баженов, В. А. Вознесенский. – М. : Стройиздат. – 192 с.
165. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетону із заданими властивостями / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, Ю. В. Гарніцький. – Рівне. – 2000. – 215 с.

166. Скрамтаев Б. Г. Способы определения состава бетона различных видов / Б. Г. Скрамтаев, П. Ф. Шубенкин., Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1966. – 159 с.
167. Graf O. Festigkeit und Elastizität von Beton mit hoher festigkeit / O. Graf. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. H.113, Vereag Ernst und Sohn, Berlin, 1954. – 85 p.
168. Optimization Methods for Material Design of Cement-based Composites/ Ed. A.M. Brandt – E&FN Spon, 1998. – 328 p.
169. Neville A. M. Wlasciwosci betonu / A. M. Neville. – Krakow, wudanie 4, 2000. – 874 s.
170. Копанский Г.В. К вопросу о подборе состава сталефибробетонной смеси / Г.В. Копанский, Л.Г. Курбатов // Производство строительных изделий и конструкций. – Л.: 1982. – С. 151–154.
171. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К.: Вища шк., 1989. – 328 с.
172. Dvorkin L. Multi-Parametric Concrete Compositions Design / L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov. Nova Science Publishers, New York, 2013. – 223 p.
173. Дворкин Л.И. Метод оптимизации составов фибробетонов / Л.И. Дворкин, О.М. Бордюженко, Н.М. Скрыпник // Технологии бетонов. – Москва, 2019. – № 3-4. – С. 40-43.
174. Конструкції будинків і споруд. Палі залізобетонні. Технічні умови. ДСТУ Б В.2.6–65:2008.
175. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови (ISO 6935–2:1991, NEQ) ДСТУ 3760:2006.
176. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками: ДСТУ Б В.2.7–214:2009.
177. Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7–176:2008.

178. Бордюженко О.М. Розрахунок складів фібробетонів за критерієм мінімальної вартості / О.М. Бордюженко, Л.Й. Дворкін, Т.В. Ковальчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: Волинські обереги. – 2018. – Вип. 36. – С. 3-10.
179. Дворкин Л.И. Проектирование составов фибробетона с использованием экспериментально-статистических моделей / Л.И. Дворкин, В.В. Житковский, Ю.А. Степасюк, Т.В. Ковальчук // Технологии бетонов. – Москва, 2016. – № 11-12. – С. 29-37.

ДОДАТКИ

Додаток А

**АКТ**

про випуск дослідної партії палей забивних С 90.30-9/1 на основі високоміцного швидкотверднучого фібробетону

30.06.2018р. у виробничо-технологічних умовах підприємства ПАТ «Рембуд» було виготовлено дослідну партію палей забивних С 90.30-9/1 згідно рекомендацій та рецептури запропонованих кафедрою ТБВіМ Національного університету водного господарства та природокористування.

Палі С 90.30-9/1 були виготовлені згідно ДСТУ Б В.2.6-65:2008. Палі залізобетонні. Технічні умови.

Палі забивні одиничні типу «С» виготовлялися суцільного квадратного перерізу з поперечним армуванням стовбура з робочої арматури та ненапружених стрижнів із сталі класу А400С, А500С по ДСТУ-3760. Характеристики палей та схема армування наведена в табл. 1 та на рис. 1 відповідно.

Таблиця 1

Характеристики палей С 90.30-9/1

Марка виробу	Довжина L, мм	a, мм	Клас бетону (марка бетону)
С 90.30-9/1	9000	250	В35 (М 450)
Об'єм бетону, м ³	Маса виробу, т	Морозостійкість	Водонепроникність
0,82	2,05	не нижче F50	не нижче W2

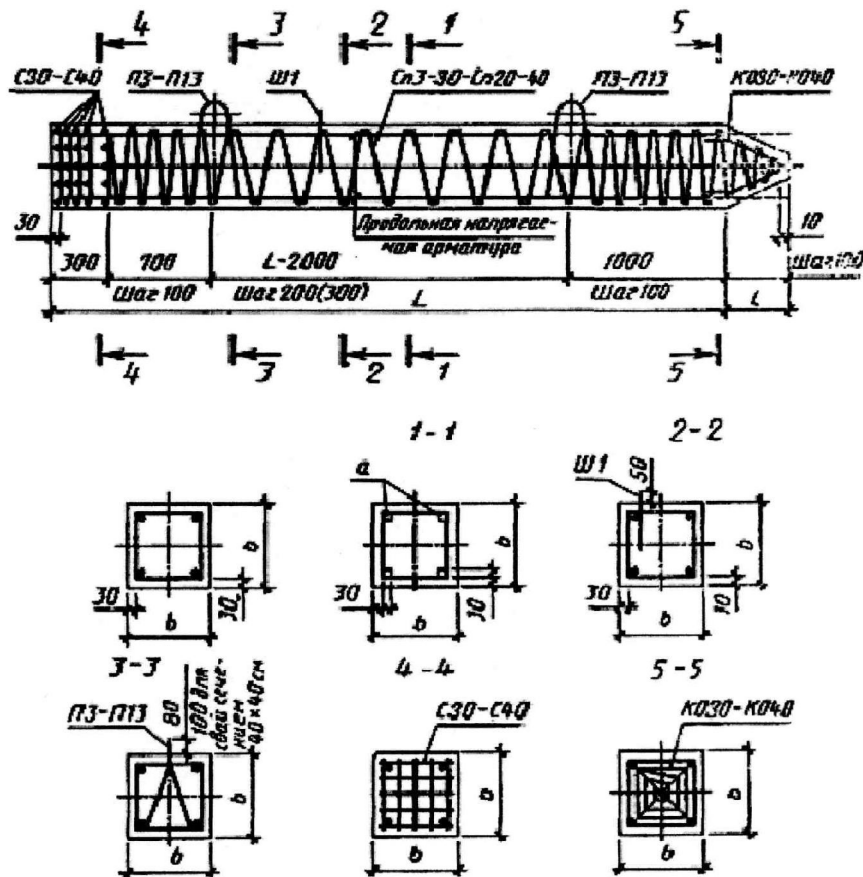


Рис. 1. Схема армування палі забивної С 90.30-9/1

Як сировинні матеріали були використані:

- портландцемент ПЦ П/А-Ш-500, виробництва ПАТ "Волиньцемент"; характеристики якого наведені в табл.2;
- щебінь гранітний фракції 5...20 мм та 20...40 мм Клесівського кар'єру Рівненської обл., характеристики якого наведені в табл.3;
- пісок середньої крупності ($M_{кр} = 1,95...2,05$) з родовищ Славутського р-ну Хмельницької обл., характеристики якого наведені в табл.3;
- суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux 2651 F. Виробник BASF Construction Polymers, Тростберг, Німеччина.
- прискорювач твердіння - «Релаксол» антифриз FS, виробник ЛТД, ТОВ Будіндустрія, Україна.;
- фібра сталева хвилеподібна довжиною 60 мм, діаметром 1 мм (Ф60/1), згідно EN 14889-1, ТУ У В.2.7-28.7-00191046-015:2007.

➤ фібра базальтова РБР-18-т10 ТзОВ "Технобазальт-Інвест" (м.Київ) довжиною 12 мм, виготовлену із базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009.

Таблиця 2
Фізико-механічні характеристики портландцементу ПЦ-П/А-Ш-500

Назва показника	Згідно ДСТУ Б В.2.7-46:2010	Середні показники ПЦ-П/А-Ш-500
Тонкість помелу, залишок на ситі №008, %	<15,0	6,0-9,0
Питома поверхня за Блейном, м ² /кг,	-	260-290
Нормальна густина цементного тіста, %	-	27,5
Строки тужавлення: початок, хв - кінець год -	> 60 < 10	90-120 5-6
Міцність у віці 2 доби, МПа: згин - стиск -	- > 15	3,0-4,2 15,0-25,0
Міцність у віці 28 діб, МПа: згин - стиск -	- > 50	5,5-6,6 50,0-52,5
Рівномірність зміни об'єму, мм	< 10	5
Вміст добавки гіпсу в перерахунку на SO ₃ ·, %	3,5	3,5

Таблиця 3

Характеристика заповнювачів

Показники	Пісок	Щебінь фракція 5...20 мм	Щебінь фракція 20...40 мм
Модуль крупності	1,95...2,05	-	-
Фракція, мм	-	5...20	20...40
Найбільша крупність зерен, мм	2,5	20	40
Повний залишок на ситі 0.63, %	38	-	-
Водопотреба, %	6,7	3,2	3,0
Вміст пилюватих і глинистих часток, %	0,9	1,0	1,0
Дійсна густина, кг/м ³	2690	2570	2570
Насипна густина, кг/м ³	1380	1450	1430
Пустотність, %	48,7	43,5	44,4

Склад пропонованих бетонних сумішей для палей забивних наведений у табл. 4.

Таблиця 4

№ з/п	Компонент	Одиниці виміру	Витрата та 1м ³
1	Портландцемент ПЦ II/A-III-500	кг	440
2	Пісок	кг	630
3	Щебінь фракції 5...20 мм	кг	520
4	Щебінь фракції 20...40 мм	кг	760
5	Суперпластифікатор Melflux 2651 F	кг	2,2
6	Добавка антифриз FS	кг	6,6
7	Фібра сталева	кг	80
8	Фібра базальтова	кг	4
9	Вода	л	110

Бетон був виготовлений у БЗЦ в змішувачах примусової дії СБ-138Б. Дозування матеріалів виконувалося з точністю для цементу, води і добавок до 1%, для заповнювачів - з точністю 2%.

Рухомість бетонної суміші складала 20 см, що відповідає марці за консистенцією Р4 (S4). В момент укладання бетонної суміші рухомість становила 10 см Р3 (S3). Ущільнення проводилося за допомогою глибинних вібраторів.




В результаті випробувань відібраних зразків-кубів у віці 1-ї доби міцність склала 44 МПа, а у віці 28 діб 89 МПа

Висновок. Застосування пропонованих бетонних сумішей дозволяє отримувати палі С 90.30-9/1 з міцністю при стиску у віці 1-ї доби до 50 МПа, а у віці 28 діб понад 80 МПа. Це дозволяє в 1-но добовому віці без тепловологісної обробки досягти марочної міцності бетону.

Аспірант кафедри ТБВіМ

Зав. лабораторією кафедри ТБВіМ, к.т.н.

Головний технолог ПАТ «Рембуд»

 Т.В. Ковальчук
 О.В. Безусяк
 Н.Л. Ілліна

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Генеральний директор

ППФ «Торгбуд сервіс»

А.М. Власюк

2019 р.



Акт

про виготовлення і впровадження дослідної партії високоміцних
фібробетонів

На ППФ «Торгбуд сервіс» було виготовлено дослідну партію бетонних сумішей для виготовлення високоміцних фибробетонів С 90/105 та дрібнозернистих фибробетонів С 70/85. Бетонні суміші виготовлені відповідно до ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1:2000, NEQ) Суміші бетонні та бетон, згідно рекомендацій та за рецептурою, розробленою кафедрою технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування.

Для виготовлення бетонних сумішей використані наступні сировинні матеріали:

- портландцемент ПЦ І – 500 за ДСТУ Б В.2.7-46:2010, виробництва ПАТ "Волинь-Цемент";
- суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux 2651 F. Виробник BASF Constraction Polymers, Тростберг, Німеччина,
- пісок середньої крупності (Мкр =1,95...2,15) з родовищ Славутського району Хмельницької обл.,
- щебінь гранітний фракцій 2-5 мм та 5-20 мм Вирівського кар'єру Рівненської області.

➤ фібра сталева хвилеподібна довжиною 60 мм, діаметром 1 мм (Ф60/1), згідно EN 14889-1, ТУ У В.2.7-28.7-00191046-015:2007 (основні характеристики наведені в табл. 1)

➤ фібра базальтова РБР-18-т10 ТзОВ "Технобазальт-Інвест" (м.Київ) довжиною 12 мм, виготовлену із базальтового ровінгу за ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009.

Таблиця 1 – Основні характеристики сталеві фібри

Найменування показника	Значення
Довжина (L), мм	60,0 ± 6,0
Діаметр (d), мм	1,0 ± 0,1
$\Lambda=L/d$	60
Тимчасовий опір розриву, МПа не менше	1335
Висота хвилі/ загнутого кінця, мм	4,5 ± 0,1
Середня густина сталі (ρ), г/см ³	7,86

Склад пропонуваніх фібробетонних сумішей наведений у табл. 2.

Таблиця 2 – Склад пропонуваніх бетонних сумішей для високоміцних фібробетонів

№	Компоненти	Важкий фібробетон, кг/м ³	Дрібнозернистий фібробетон, кг/м ³
1	Цемент ПЦ І-500	500	500
2	Вода	125	150
3	Щебінь фракції 2-5 мм	-	1023
4	Щебінь фракції 5-20 мм	1252	-
5	Сталева фібра Ф60/1	60	100
6	Базальтова фібра	2	2
7	Пісок	635	807
8	Суперпластифікатор Melflux 2651 F	2,5	2,5

Фібробетон був виготовлений в змішувачах примусової дії. Дозування матеріалів виконувалося з точністю для цементу, води, добавок і фібри до 1%, для заповнювачів - з точністю до 2%. Рухомість бетонної суміші складала 16... 18 см, що відповідає марці за консистенцією S4 (P4).

Після виготовлення зразків були визначені їх нормативні показники якості за ДСТУ Б В.2.6-214:2009. Випробування проводилися в Науково-дослідній лабораторії будівельних матеріалів і виробів (свідоцтво про атестацію №РТ-0141/2015 від 23.12.2015 р.)

Результати випробувань, наведені в табл. 3, свідчать про те, що фактична міцність фібробетону, який виготовлений у виробничих умовах відповідає нормативному значенню згідно ДСТУ Б В.2.7-176:2008.

Таблиця 3 – Результати випробувань запропонованих складів фібробетонних сумішей

№	Вид бетону	Рухомість суміші, ОК, см	Міцність, згідно ДСТУ Б В.2.7-176:2008, МПа,	Міцність при стиску у віці діб, МПа			
				1	3	7	28
1.	Важкий фібробетон С 90/105	18	105	69,0	88,4	100,4	108,8
2.	Дрібнозернистий фібробетон С 70/85	16	85	39,1	65,3	79,4	87,4

Висновок: За результатами випробувань ППФ «Торгбуд сервіс» прийняв запропоновані рецептури високоміцних фібробетонів для впровадження у виробництво.

Головний технолог
ППФ «Торгбуд сервіс»

Аспірант кафедри ТБВіМ
Зав. лабораторію кафедри ТБВіМ, к.т.н.



Савич
Безусяк

Т.В. Ковальчук
О.В. Безусяк

Додаток В

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Є.М. Бабич, В.В. Житковський, О.М. Бордюженко, С.В. Філіпчук, Д.В. Кочкар'юв, І.В. Ковалик, Т.В. Ковальчук, М.М. Скрипник // Рівне: НУВГП. – 2017. – 331 с.

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Дворкін Л.Й. Оптимізація складу високоміцного сталевіфібробетону / Л.Й. Дворкін, Т.В. Ковальчук // Строительные материалы и изделия. – 2016. – №2-3 (92). – С. 38-41.

3. Дворкін Л.Й. Вплив виду сталеві фібри на міцнісні властивості сталевіфібробетонів / О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Строительные материалы и изделия. – 2017. – №1-2 (94). – С. 25-29.

4. Ковальчук Т.В. Дослідження водопотреби фібробетонних сумішей з використанням суперпластифікаторів / Т.В.Ковальчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП. – 2017. – Вип. 34. – С. 18-26.

5. Бордюженко О.М. Розрахунок складів фібробетонів за критерієм мінімальної вартості / О.М. Бордюженко, Л.Й. Дворкін, Т.В. Ковальчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Рівне: Волинські обереги. – 2018. – Вип. 36. – С. 3-10.

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

6. Дворкин Л.И. Проектирование составов фибробетона с использованием экспериментально-статистических моделей / Л.И. Дворкин, В.В. Житковский, Ю.А. Степасюк, Т.В. Ковальчук // Технологии бетонов. – Москва, 2016. – № 11-12. – С. 29-37.

7. Дворкин Л.И. Технологические особенности фибробетонных смесей с использованием суперпластификаторов / Л.И. Дворкин, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Технологии бетонов. – Москва, 2018. – № 5-6. – С. 36-40.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Ефективність бетонів на вітчизняному суперпластифікаторі / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, М.М. Скрипник, Т.В. Ковальчук. // Будівництво України. – 2017. – №4. – С. 10-13.

9. Дворкін Л.Й. Вплив дисперсного армування на властивості бетону виготовленого на малоклінкерному шлакопортландцементі / Л.Й. Дворкін, Ю.О. Степасюк, Т.В. Ковальчук // Сб. трудов XIII Международной научно-практической конференции "Состояние современной строительной науки-2015". – Полтава, 2015. – С. 51-55.

10. Дворкін Л.Й. Вплив орієнтації сталюї фібри на механічні характеристики фібробетону / Л.Й. Дворкін, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Матеріали 6-ї міжнародної науково-практичної конференції "Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві". – Харків, 2016. – С 31-32.

11. Дворкін Л.Й. Ефективність дисперсного армування високоміцного дрібнозернистого бетону / Л.Й. Дворкін, О.М. Бордюженко, Т.В. Ковальчук // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті". – Харків, 2017. – С. 81-83.

Патент:

12. Пат. 111661 Україна МПК В28В 1/52. Спосіб отримання бетону дисперсно-армованого орієнтованою сталюю фіброю / Л.Й. Дворкін, Є.М. Бабич, О.М. Бордюженко, В.В. Житковський, Т.В. Ковальчук // Заявник та патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u201603075; заявл. 25.03.2016; опубл. 25.11.2016; Бюл. № 22. – 4 с.

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення дисертаційної роботи та її результати доповідались і обговорювались на конференціях:

- XIII Міжнародній науково-практичній конференції "Стан сучасної будівельної науки-2015" (Полтава, 2015);

- 6-й міжнародній науково-практичній конференції "Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві" (Харків, 2016);

- VI Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті" (Харків, 2017)

- науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету водного господарства та природокористування (Рівне, 2015-2018 рр.).

Додаток Г

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Навчально-наукового
інституту

будівництва та архітектури

Національного університету водного
господарства та природокористування

 _____ Р.М.Макаренко

АКТ

впровадження наукових результатів кандидатської дисертаційної роботи
Ковальчука Т.В. на тему " Високоміцний фібробетон із композиційним
дисперсним армуванням" в навчальний процес Національного університету водного
господарства та природокористування

Нами, головою науково-методичної комісії спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія», д.т.н., професором Бабичем Є. М. та заступником директора з навчально-методичної роботи Навчально-наукового інституту будівництва та архітектури, к.т.н., доцентом Шадурою В. О. складено даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Ковальчука Т. В. впроваджені в навчальний процес на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства, зокрема в курсах "Проектування складів бетонів та розчинів різних видів" та "Аналіз будівельно-технологічних задач та методи їх оптимального рішення", що викладаються для здобувачів вищої освіти другого рівня (магістр) за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». В даних курсах використані матеріали роботи, що стосуються методів проектування складів фібробетонів з використанням експериментально-статистичних моделей а також їх аналізу та оптимізації.

Голова науково-методичної комісії
спеціальності 192 «Будівництво
та цивільна інженерія»,
д.т.н., професор

 С.М. Бабич

Заступник директора з навчально-методичної роботи
Навчально-наукового інституту
будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент

 В.О. Шадура