

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАЗУРАК РОСТИСЛАВ АНДРІЙОВИЧ

УДК 624.012.

ДИСЕРТАЦІЯ

АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ У ФІБРОБЕТОНІ

192 - Будівництво та цивільна інженерія
19 Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Р.А. Мазурак

Науковий керівник (консультант) Білозір Віталій Володимирович, кандидат
технічних наук, доцент

Львів – 2023

АНОТАЦІЯ

Мазурак Р. А. Анкерування стрижневої арматури у фібробетоні. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Львівський національний університет природокористування, Львів, 2023.

Дисертація присвячена дослідженню анкерування стрижневої арматури класу А500С у фібробетоні, армованому сталевією фіброю зі загнутими кінцями типу HE1050 українського виробництва та розробці пропозицій щодо розрахунку нормальних напружень у завантажуваних кінцях стрижнів і дотичних напружень між стрижнями та сталевією фібробетоном на різних стадіях роботи за їх витягування, а також пропозицій щодо визначення базової і розрахункової довжини анкерування. Виконана дослідницька робота містить результати та аналіз експериментальних й аналітичних методів, а також методів математичного моделювання, які використані для оцінки зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном.

Проведені дослідження передбачали вивчення впливу міцності бетону, відношення довжини анкерування стрижня до його діаметра, коефіцієнта фібрового армування за об'ємом і діаметра стрижнів на розвиток зсувів і напруження у стрижнях та дотичні напруження між стрижнями і фібробетоном. Використано повний чотирифакторний план експерименту (план 2^4) і отримані рівняння регресії для визначення напружень у стрижнях на початковій зсуву, за зсуву 0,1 мм і для максимальних значень напружень, а також відповідних дотичних напружень між стрижнями і фібробетоном. На основі експериментальних даних, отриманих за використання повного чотирифакторного експерименту, запропоновано методику розрахунку нормальних і дотичних напружень.

На основі теоретичного аналізу проведених досліджень, враховуючи наявні нормативні джерела і проведені експериментальні дослідження,

запропоновано аналітичну залежність для розрахунку граничних напружень зчеплення стрижнів із фібробетоном та алгоритм визначення розрахункової довжини анкерування.

У **вступі** обґрунтовано напрям досліджень, мету і завдання, основні методи досліджень, що забезпечують достовірність результатів. Представлено зв'язок роботи із науковими програмами, практичне значення та наукову новизну дисертаційної роботи.

Перший розділ відображає аналіз існуючих методів розрахунку зчеплення арматури з бетоном у залізобетонних конструкціях. Розвиток теорії зчеплення арматури з бетоном має тривалий шлях і постійно вдосконалюється, тому станом на сьогодні умовно можна виокремити окремі напрями досліджень. Вони відображають процес розвитку і вдосконалення методів досліджень і розрахунку та обумовлюють чинники, які впливають на зчеплення арматури з бетоном. На довжину анкерування арматури в бетоні впливає напружено-деформований стан бетону, з якого витягується арматура, товщина захисного шару бетону, діаметр і профіль арматурного стрижня, міцність арматури та бетону, наявність поперечної арматури та площа її перерізу, вид заповнювача бетонної суміші, умови бетонування, внутрішні напруження у бетоні тощо.

У літературних джерелах обумовлені відмінності у методах і підходах щодо розрахунку необхідної довжини анкерування арматурних стрижнів у бетоні.

Результати досліджень свідчать про те, що локальне послаблення зчеплення з бетоном спричиняє перерозподіл напружень уздовж осі стрижня. Експериментально встановлено, що зчеплення стрижнів серпоподібного профілю з бетоном є суттєво меншим, ніж зчеплення з бетоном арматури кільцевого профілю.

Експериментально-теоретичні дослідження різних авторів свідчать про позитивний вплив сталеві фібри на анкерування арматури у фібробетоні.

Посилення бетону фіброю сприяє заклинюванню стрижнів, збільшенню значень як радіальних зусиль, так і максимальних зусиль за витягування стрижнів із бетону.

Низка досліджень свідчить, що фіброве армування сприяє підвищенню зчеплення стрижнів із бетоном, однак методики розрахунку необхідної довжини анкерування для цього випадку поки що не запропоновано.

За результатами аналітичного огляду літератури, який свідчить про те, що питання зчеплення стрижнів серпоподібного профілю з бетоном, армованим фіброю зі загнутими кінцями типу HE1050 українського виробництва, практично не вивчені, сформульовано мету та завдання досліджень дисертаційної роботи.

Другий розділ дисертації містить обґрунтування методики проведення досліджень. Програма досліджень передбачала оцінку впливу міцності бетону класів C20/25, C25/30, C30/35, відношення довжини анкерування стрижня до його діаметра (8, 10, 12), коефіцієнта фібрового армування за об'ємом (0,007; 0,0125; 0,018) та діаметра стрижнів (8, 10, 12 мм) на розвиток зсувів і напруження у стрижнях та відповідні дотичні напруження між стрижнями і сталевібробетоном. В експериментальних зразках класи бетону прийнято такими, що найчастіше використовуються в конструкціях без попереднього напруження бетону. Відношення довжин анкерування стрижнів до їх діаметрів l_b/\varnothing прийнято такими, щоб стрижні при витягуванні не розривалися. Коефіцієнти армування фіброю за об'ємом призначено такими, що, як правило, використовуються в несучих комбіновано армованих конструкціях. Діаметри стрижнів прийнято такими, які можуть використовуватися в комбіновано армованих сталевібробетонних конструкціях із низьким вмістом стрижневого армування, що може мати місце в елементах плитного типу та в балках, у яких відсутня поперечна арматура.

Міцнісні та деформативні характеристики бетону та арматури визначали експериментально з випробувань кубів, призм, циліндрів та арматурних стрижнів завдовжки 50 см [45; 46; 48; 49].

За експериментальних досліджень використовували метод витягування арматурних стрижнів із бетонних чи фібробетонних зразків призматичної форми і балковий метод. Експериментальні дослідження передбачали випробування стрижнів арматури класу А500С, зароблених по центру основи призматичних зразків розмірами 150×150×200 мм, на витягування. Балки мали поперечний переріз 120 x 220 мм, склалися з двох ділянок завдовжки 600 мм і містили по одному стрижню, закладеному на визначену програмою випробувань довжину у бетон чи фібробетон. Завантаження балкових зразків виконували двома зосередженими силами, прикладеними в прольоті. Під час випробувань контролювали зусилля, прикладене до стрижня арматури класу А500С і переміщення його незавантаженого кінця [11; 26; 80; 84; 85; 98; 101; 103; 138].

Для оптимізації обсягу експериментальних досліджень використано метод планування повного чотирифакторного експерименту, оскільки прийнята гіпотеза про приблизно лінійний вплив факторів на нормальні і дотичні напруження [25; 26; 42]. За фактори експерименту прийнято призмову міцність бетону $f_{cm,prism}$, відносну довжину закладання стрижня у фібробетон l_b/Φ , коефіцієнт фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} і діаметр стрижнів Φ . Багатофакторний експеримент використано з метою отримання рівнянь регресії для визначення напружень у стрижнях і дотичних напружень на різних стадіях роботи стрижнів за витягування та визначення надалі базової і необхідної довжини анкерування стрижнів у сталеві фібробетоні.

Результати експериментальних досліджень призмових і балкових зразків засвідчили, що армування сталевую фіброю українського масового виробництва збільшує зчеплення арматури з фібробетоном.

Використання апробованих методик експериментальних досліджень дозволило отримати нові експериментальні дані щодо зчеплення арматури серпоподібного профілю з фібробетоном на фібрі вітчизняного виробництва і запропонувати методику визначення базової і необхідної довжини анкерування стрижнів.

Третій розділ містить результати експериментальних досліджень анкерування стрижневої арматури класу А500С у фібробетоні зразків, зароблених по центру основи призми розмірами 150×150×200 мм, на витягування. Випробувано 93 зразки, з яких 72 містили фіброве армування. За використання повного чотирифакторного плану експерименту (план 2⁴) випробувано 48 зразків, що дозволило отримати рівняння регресії для визначення напружень у стрижнях і дотичних напружень між стрижнями і сталеві фібробетоном на початкові зсуву, за зсуву 0,1 мм і для максимальних значень напружень.

Слід відзначити, що на всіх стадіях роботи стрижня за витягування із призми, найбільший вплив на напруження зчеплення має міцність бетону і вміст фібрової арматури, дещо менший вплив має діаметр стрижнів. Відносна довжина закладання стрижнів у фібробетон l_b/\varnothing не впливала на ці напруження на початкові зсуву і за зсуву стрижнів на 0,1 мм. Незначний вплив довжина закладання стрижнів у фібробетон l_b/\varnothing має на ці напруження за дії максимальних витягувальних зусиль.

Четвертий розділ містить результати досліджень анкерування стрижнів арматури класу А500С у фібробетоні зразків балкового типу, які за своїм характером роботи максимально наближені до реальних конструкцій. Аналіз експериментально-теоретичних досліджень базувався на результатах випробувань 32 зразків балкового типу, з яких 16 містили фіброве армування.

За значеннями зовнішніх згинальних моментів балкових зразків отримували витягувальне зусилля, прикладене до арматури, нормальні

напруження в стрижнях, дотичні напруження між стрижнем і фібробетоном чи бетоном балок.

Результати експериментальних досліджень балкових зразків засвідчили, що рівняння регресії, отримані в розділі 3, можна використати для оцінювання нормальних напружень у стрижнях і дотичних напружень між стрижнями і фібробетоном на початкові зсуву стрижнів, за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм і за максимальних витягувальних зусиль за умови помноження правих частин цих рівнянь на відповідні коригувальні (знижувальні) коефіцієнти, отримані за результатами експериментів.

Виконані дослідження анкерування стрижневої арматури класу А500С у фібробетоні, армованому сталеву фібрую зі загнутими кінцями типу HE1050 українського виробництва, дали змогу визначити низку особливостей роботи стрижнів за витягування зі зразків, також запропоновано залежність для розрахунку граничних напружень зчеплення стрижнів із фібробетоном балкових елементів f_{bd} та алгоритм розрахунку базової і розрахункової довжини анкерування.

Результати експериментально-теоретичних досліджень апробовано окремими проєктними організаціями за розрахунку елементів залізобетонних покриттів і перекриттів, що містять фіброве армування, та використано в навчальному процесі Львівського національного університету природокористування у підготовці фахівців будівельної галузі.

Ключові слова: сталева фібра, бетон, сталеві фібробетон, стрижнева арматура, зразки, випробування на витягування, адгезія, зчеплення, анкерування.

ABSTRACT

Mazurak R.A. Anchoring of rod reinforcement in fiber concrete. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 "Construction and civil engineering". - Lviv National University of Nature Management, Lviv, 2023.

The dissertation is dedicated to the study of the anchoring of rod reinforcement of class A500C in fiber concrete reinforced with steel fiber with bent ends of the HE1050 type of Ukrainian production and the development of proposals for the calculation of normal stresses in the loaded ends of the rods and tangential stresses between the rods and steel fiber concrete at various stages of work during their extraction, as well as proposals regarding the determination of the basic and estimated length of anchoring. The performed research work contains the results and analysis of experimental and analytical methods, as well as mathematical modeling methods, which are used to evaluate the adhesion of rod reinforcement with fiber concrete.

The conducted studies included the study of the influence of concrete strength, the ratio of the anchoring length of the rod to its diameter, the coefficient of fiber reinforcement by volume and the diameter of the rods on the development of shifts and stresses in the rods and tangential stresses between the rods and fiber concrete. A full four-factor experiment plan (plan 24) was used and regression equations were obtained to determine the stresses in the rods for the initial displacement, for a displacement of 0.1 mm and for the maximum stress values, as well as the corresponding tangential stresses between the rods and fiber concrete. Based on the experimental data obtained using a full four-factor experiment, a methodology for calculating normal and tangential stresses is proposed.

Based on the theoretical analysis of the conducted studies, taking into account the available normative sources and the conducted experimental studies, an analytical dependence is proposed for calculating the ultimate stresses of the connection of rods with fiber concrete and an algorithm for determining the estimated anchoring length.

The introduction substantiates the direction of research, the goal and task, the main methods of research that ensure the reliability of the results. The connection of the work with scientific programs, the practical significance and scientific novelty of the dissertation work are presented.

The first section reflects the analysis of existing methods of calculating the adhesion of reinforcement to concrete in reinforced concrete structures. The development of the theory of the connection of reinforcement with concrete has a long way and is constantly being improved, therefore, as of today, it is possible to conditionally single out certain areas of research. They reflect the process of development and improvement of research and calculation methods and determine the factors that affect the adhesion of reinforcement to concrete. The length of reinforcement anchoring in concrete is affected by the stress-strain state of the concrete from which the reinforcement is extracted, the thickness of the protective layer of concrete, the diameter and profile of the reinforcing rod, the strength of the reinforcement and concrete, the presence of transverse reinforcement and its cross-sectional area, the type of aggregate in the concrete mixture, the conditions of concreting, internal stresses in concrete, etc.

Differences in methods and approaches to calculating the required anchoring length of reinforcing bars in concrete are determined in literary sources.

Research results indicate that the local weakening of the bond with concrete causes a redistribution of stresses along the axis of the rod. It was experimentally established that the adhesion of sickle profile rods to concrete is significantly less than the adhesion of ring profile reinforcement to concrete.

Experimental and theoretical studies of various authors testify to the positive influence of steel fiber on the anchoring of reinforcement in fiber concrete. Reinforcement of concrete with fiber contributes to the jamming of the rods, increasing the values of both radial forces and maximum forces for pulling the rods out of the concrete.

A number of studies show that fiber reinforcement helps to increase the adhesion of rods to concrete, but the methods of calculating the required length of anchoring for this case have not yet been proposed.

According to the results of an analytical review of the literature, which shows that the issue of the connection of sickle-shaped rods with fiber-reinforced concrete

with bent ends of the HE1050 type of Ukrainian production is practically not studied, the goal and objectives of the research of the dissertation were formulated.

The second section of the dissertation contains the justification of the research methodology. The research program included an assessment of the impact of the strength of concrete classes C20/25, C25/30, C30/35, the ratio of the rod anchoring length to its diameter (8, 10, 12), the coefficient of fiber reinforcement by volume (0.007; 0.0125; 0.018) and the diameter of the rods (8, 10, 12 mm) on the development of shears and stresses in the rods and the corresponding tangential stresses between the rods and steel-reinforced concrete. In the experimental samples, the classes of concrete are adopted as those that are most often used in structures without prestressing the concrete. The ratio of the anchoring lengths of the rods to their diameters l_b/\varnothing is taken such that the rods do not break when pulled. The coefficients of fiber reinforcement by volume are assigned to those that are usually used in load-bearing composite reinforced structures. The diameters of the rods are taken as those that can be used in composite reinforced steel fiber concrete structures with a low content of rod reinforcement, which can occur in plate-type elements and in beams that do not have transverse reinforcement.

The strength and deformation characteristics of concrete and reinforcement were determined experimentally from tests of cubes, prisms, cylinders, and reinforcing rods 50 cm long [45; 46; 48; 49].

Experimental studies used the method of drawing reinforcing rods from concrete or fiber concrete samples of a prismatic shape and the beam method. The experimental studies involved tensile testing of the A500C reinforcement rods, which were driven into the center of the base of the prismatic samples with dimensions of 150×150×200 mm. The beams had a cross-section of 120 x 220 mm, consisted of two sections 600 mm long and each contained one rod embedded in concrete or fiber concrete to the length determined by the test program. The beam samples were loaded with two concentrated forces applied in the span. During the

tests, the force applied to the armature rod of class A500C and the movement of its unloaded end were controlled [11; 26; 80; 84; 85; 98; 101; 103; 138].

To optimize the volume of experimental studies, the method of planning a full four-factor experiment was used, since the hypothesis of an approximately linear influence of factors on normal and tangential stresses was adopted [25; 26; 42]. The factors of the experiment are the prism strength of concrete $f_{(cm,prism)}$, the relative length of the rod embedded in fiber concrete l_b / \varnothing , the coefficient of fiber reinforcement by volume ρ_{fv} and the diameter of the rods \varnothing . A multifactorial experiment was used to obtain regression equations for determining the stresses in the rods and tangential stresses at various stages of the rods' work during pulling and to further determine the basic and required anchoring length of the rods in steel-reinforced concrete.

The results of experimental studies of prism and beam samples proved that reinforcement with Ukrainian mass-produced steel fiber increases the adhesion of reinforcement to fiber concrete.

The use of proven methods of experimental research made it possible to obtain new experimental data on the adhesion of sickle-shaped profile reinforcement with fiber concrete on domestically produced fiber and to propose a method for determining the basic and required length of anchoring rods.

The third section contains the results of experimental research on the anchoring of A500C class rod reinforcement in fiber concrete of samples, earned in the center of the base of the prism with dimensions of $150 \times 150 \times 200$ mm, for pulling. 93 samples were tested, of which 72 contained fiber reinforcement. Using the full four-factor experimental plan (plan 24), 48 samples were tested, which made it possible to obtain the regression equation for determining the stresses in the rods and the tangential stresses between the rods and steel fiber concrete for the initial displacements, for the displacement of 0.1 mm and for the maximum values of the stresses.

It should be noted that at all stages of operation of the rod when pulling out of the prism, the strength of the concrete and the content of fiber reinforcement have the greatest influence on the bond stress, the diameter of the rods has a somewhat smaller influence. The relative length of the rods embedded in fiber concrete l_b/\varnothing did not affect these stresses at the initial displacements and after displacement of the rods by 0.1 mm. The length of laying the rods in fiber concrete l_b/\varnothing has a negligible effect on these stresses under the action of maximum tensile forces.

The fourth section contains the results of research on the anchoring of reinforcement rods of class A500C in fiber concrete of beam-type samples, which by their nature of work are as close as possible to real structures. The analysis of experimental and theoretical studies was based on the test results of 32 beam-type samples, 16 of which contained fiber reinforcement.

According to the values of the external bending moments of the beam samples, the tensile force applied to the reinforcement, the normal stresses in the rods, and the tangential stresses between the rod and the fiber concrete or the concrete of the beams were obtained.

The results of experimental studies of beam samples proved that the regression equations obtained in chapter 3 can be used to estimate the normal stresses in the rods and the tangential stresses between the rods and the fiber concrete for the initial displacements of the rods, for the displacement of the unloaded end of the rod of 0.1 mm and for the maximum tensile forces provided that the right-hand sides of these equations are multiplied by the corresponding correction (reduction) coefficients obtained from the results of experiments.

Conducted research on the anchoring of A500C class rod reinforcement in fiber concrete reinforced with steel fiber with bent ends of type HE1050 of Ukrainian production made it possible to determine a number of features of the rods when pulled from the samples, and also proposed a dependence for calculating the ultimate bond stresses of rods with fiber concrete of beam elements f_{bd} and a calculation algorithm basic and estimated length of anchoring.

The results of experimental and theoretical research were tested by individual project organizations for the calculation of elements of reinforced concrete coatings and ceilings containing fiber reinforcement, and were used in the educational process of the Lviv National University of Nature Management in the training of specialists in the construction industry.

Key words: steel fiber, concrete, steel fiber concrete, rod armature, samples, pull-out test, adhesion, coupling, anchoring.

Список опублікованих праць здобувача за темою дисертації

У наукових фахових виданнях України:

1. Мазурак Р. А., Цап О. М. Аналіз методик розрахунку необхідної довжини анкерування стрижневої арматури в бетоні та сталевіфібробетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету*. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2018. № 19. С. 49-52.
2. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Аналіз чинників, що впливають на зчеплення арматури серпоподібного профілю з бетоном і фібробетоном. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Вип. 14, Луцьк: ЛНТУ, 2020. С. 47- 54.
3. Мазурак Р. Огляд досліджень анкерування арматурних стрижнів у сталевіфібробетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету*. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2021. № 22. С. 47 – 53.
4. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Математична модель зчеплення стрижневої арматури зі сталевіфібробетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. Вип. 41. С. 103- 109.
5. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Анкерування стрижневої арматури класу А500С у сталевібетоні. *Вісник Львівського національного університету природокористування*. Сер. Архітектура та будівництво. 2022. № 23. С.19-26.

6. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Зчеплення стрижневої арматури класу А500С зі сталевібробетоном зразків балкового типу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Вип. 18. Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 22 – 33.
- У наукових виданнях матеріалів конференції:
1. Білозір Віт., Мазурак Р., Подгорецькій А. Утворення та розкриття тріщин у перерізах, нормальних до поздовжньої осі комбіновано армованих сталевібробетонних балок. *Міжнародна науково-практична конференція «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села»* (Дубляни – Львів, 15-17 травня 2019 р.) С.93-96
 2. Білозір Віт., Мазурак Р. Обґрунтування програми експериментальних досліджень зчеплення арматурних стержнів з фібробетоном. *XX Міжнародний науково-практичний форум «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій»* (м. Львів, ЛНАУ, 17-19 вересня 2019 року) С.365-367.
 3. Мазурак Р. Аналітичний огляд зарубіжних досліджень зчеплення стрижневої арматури серповидного профілю зі сталевібетоном. *Міжнародна науково-практична конференція «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села»* (Дубляни – Львів 24-25 червня 2021 р.) С.46-48.
 4. Білозір Віт., Мазурак Р. Анкерування стрижневої арматури класу А500С у сталевібробетоні. *Міжнародна науково-практична конференція «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села»* (м. Львів, ЛНАУ, 16-17 червня 2022 року) С.15-17.
 5. Білозір Віт., Мазурак Р. Математична модель зчеплення стрижневої арматури зі сталевібробетоном на початкові зсуву. *XXIII Міжнародний науково-практичний форум «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій»* (м. Львів, ЛНУП, 4-6 жовтня 2022 року) С. 527-530.

ЗМІСТ

ВСТУП	17
1 СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	22
1.1 Аналіз існуючих методів розрахунку зчеплення арматури з бетоном у залізобетонних конструкціях	22
1.2 Огляд закордонних досліджень зчеплення стрижневої арматури з бетоном і фібробетоном	26
1.3 Дослідження зчеплення арматурних стрижнів з фібробетоном	35
1.4 Висновки до розділу 1	43
2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ	44
2.1 Обґрунтування методики досліджень	44
2.2 Матеріали та конструкція дослідних зразків	50
2.3 Експериментальні дослідження призмових і балкових зразків	60
Висновки до розділу 2	68
2.4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ А500С У ФІБРОБЕТОНІ ЗРАЗКІВ ПРИЗМОВОГО ТИПУ ТА ЇХ АНАЛІЗ	69
3 ДОСЛІДЖЕННЯ АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ	
3.1 Розвиток зсувів незавантажених кінців стрижнів за витягування зі зразків призмового типу	69
3.2 Дослідження анкерування стрижневої арматури у сталеві фібробетоні з використанням методу планування експерименту	81
3.2.1 Математичні моделі для визначення напружень у стрижневій арматурі та напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном на початку зсуву	81

3.2.2	Математичні моделі для визначення максимальних напружень у стрижневій арматурі та максимальних напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном.....	102
3.2.3	Математичні моделі для визначення напружень у стрижневій арматурі та напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном за зсуву незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм	117
3.3	Висновки до розділу 3	133
4	РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ А500С У ФІБРОБЕТОНІ ЗРАЗКІВ БАЛКОВОГО ТИПУ ТА ЇХ АНАЛІЗ	135
4.1	Розвиток зсувів незавантажених кінців стрижнів за витягування зі зразків балкового типу.....	135
4.2	Нормальні напруження у стрижнях і дотичні напруження між стрижнями і фібробетоном за витягування з розтягнутої зони сталевіфробетону балок	143
4.3	Пропозиції щодо розрахунку анкерування стрижневої поздовжньої арматури у сталевіфробетоні	161
4.4	Висновки до розділу 4	167
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	169
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	171
	Додаток А. Впровадження результатів досліджень.	187
	Додаток Б. Список опублікованих праць за темою дисертації	190
	Додаток В. Відомості про апробацію результатів дисертації	191

Вступ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Важливими напрямками розвитку сучасних залізобетонних конструкцій є розробка і використання ефективних видів металевої і неметалевої арматури, а також високоміцних бетонів та фібробетонів. Опір бетону поздовжнім зміщенням арматури називаємо зчепленням, яке залежить від геометричних і механічних характеристик арматури і бетону, фібробетону. Вивченню проблеми зчеплення арматури в бетоні присвячено чимало досліджень, що обумовлює актуальність і складність завдання [11; 13; 15; 21; 33; 44; 62; 66; 80; 101]. Зчеплення арматури у фібробетоні – ще більш не досліджена проблема, адже значно більша кількість чинників впливає на міцність зчеплення [19; 22; 24; 53; 56; 109].

У будівельній галузі України, починаючи з 90-х років минулого століття, для армування залізобетонних конструкцій почали використовувати сталеві стрижні серпоподібного профілю, які практично витіснили арматуру з кільцевим профілем. У дослідників на сьогодні ще немає єдиного погляду щодо кількісної оцінки впливу різних чинників на руйнівні зусилля за зсуву стрижнів відносно бетону, у тому числі армованого фіброю. У зв'язку з цим важливим стає вдосконалення розрахункового апарату для визначення необхідної довжини анкерування стрижнів серпоподібного профілю у бетоні та фібробетоні, волокна якого здатні блокувати розвиток мікротріщин у місцях контакту поперечних ребер стрижнів із бетоном, втягувати у спільну роботу більші обсяги шарів фібробетону [23].

Фіброве армування можна розглядати як різновид непрямого армування, яке впливає на міцність зчеплення стрижневої арматури з бетоном, адже його можна уподібнити до часто поставлених перпендикулярно до стрижня елементів, що витягуються з бетону. Посилення бетону фібровою арматурою сприяє заклинюванню стрижнів, збільшенню значень як радіальних зусиль, так і максимальних зусиль за витягування стрижнів із бетону [25]. Форма

поверхні фібрової арматури впливає на зчеплення її з бетонною матрицею, також на показник напруження у фібрі, особливо в разі використання фібри із загнутими кінцями з дроту [22; 23; 28]. Позитивний вплив фібри на зчеплення стрижнів у бетоні потребує додаткового вивчення, через велику кількість типів сталевих фібри.

Дослідження анкерування стрижневої арматури класу А500С у бетоні, армованому сталеву фібрую зі загнутими кінцями, дали б змогу обґрунтовано визначати напруження і призначати необхідну довжину анкерування стрижнів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася згідно з тематикою науково-дослідних робіт кафедри будівельних конструкцій на 2016 – 2020 рр. в рамках виконання теми факультету будівництва та архітектури ЛНАУ «Ресурсоощадні конструктивно-технологічні вирішення будівель і споруд АПК та архітектурно-планувальні аспекти розвитку сільських територій» (обліковий номер 0221U100902) і факультетської теми на 2021 – 2025 рр. «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» (номер держреєстрації 0121U100335). Договір № 26/05 від 26 травня 2021 р ТзОВ «Т.В.Д» і ЛНУП. Науковий і лабораторний супровід виробничої програми при будівництві об'єктів.

Мета роботи – дослідження анкерування стрижневої арматури класу А500С у фібробетоні, армованому сталеву фібруюю зі загнутими кінцями типу HE1050 українського виробництва, та розробка пропозицій щодо визначення розрахункової довжини анкерування.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі **завдання досліджень**:

- виконати експериментальні дослідження зчеплення арматурних стрижнів з фібробетоном за статичного короткочасного навантаження за використання апробованих методик на призмових і балкових зразках;

- з'ясувати вплив відносної довжини закладання стрижнів, міцності бетону, вмісту фібрової арматури в одиниці об'єму бетону, діаметра стрижнів на напруження в арматурі і дотичні напруження між стрижнями і фібробетоном;
- на основі результатів експериментальних досліджень розробити рекомендації для розрахунку міцності зчеплення стрижнів із фібробетоном та довжини анкерування стрижнів;

Об'єкт дослідження – зразки із фібробетону із замоноліченими в них на різну довжину арматурні стрижні.

Предмет дослідження – анкерування стрижневої арматури періодичного профілю у фібробетоні.

Методи дослідження: аналіз літературних джерел, експериментальні дослідження анкерування арматурних стрижнів у фібробетоні; статичний аналіз результатів досліджень; математичне моделювання; порівняльний аналіз теоретичних даних і даних, отриманих експериментальним шляхом.

Наукова новизна одержаних результатів.

За результатами виконаної роботи:

- вперше отримано експериментальні дані про зміщення незавантажених кінців арматурних стрижнів класу А500С і відповідні зусилля за витягування цих стрижнів зі сталеві фібробетонних зразків призмового і балкового типу, армованих сталевую фіброю зі загнутими кінцями типу HE1050 українського виробництва;

- на основі повного чотирифакторного експерименту (ПФЕ 2⁴) виявлено вплив відносної довжини закладання стрижнів у сталеві фібробетонні зразки призмового типу, міцності бетону, вмісту фібрової арматури та діаметра стрижнів на напруження у стрижнях, дотичні напруження між стрижнями і фібробетоном та отримано рівняння регресії для визначення цих напружень на початку зсуву, за зсуву незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм та за дії максимальних витягувальних зусиль;

– запропоновано подані вище напруження за витягування стрижнів із розтягнутих зон сталевібробетонних балкових зразків визначати за тими ж рівняннями регресії, що і для зразків призмового типу, з помноженням правих частин цих рівнянь на відповідні знижувальні коефіцієнти;

– запропоновано експериментально обґрунтована формулу для розрахунку граничних напружень зчеплення стрижнів зі сталевібробетоном і відповідний алгоритм визначення розрахункової довжини анкерування.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано алгоритм оцінки показника розрахункової довжини анкерування стрижневої арматури серпоподібного перерізу в сталевібробетоні та обґрунтовано розрахункову залежність для розрахунку граничних напружень зчеплення додаток А. Результати проведеної науково-дослідної роботи розширюють діапазон загальної теорії зчеплення арматури з фібробетоном.

Особистий внесок здобувача. Викладені в дисертаційній роботі наукові розробки та практичні результати отримані автором особисто. У поданих в додатку Б публікаціях із співавторами здобувачу належать відповідно в роботах: [1] – провів аналіз досліджень анкерування стрижневої арматури в бетоні та сталевібробетоні, оцінив вплив різних чинників на значення необхідної довжини анкерування стрижневої арматури; [2] – на основі експериментально-теоретичних досліджень зчеплення стрижнів серпоподібного профілю з бетоном розробив пропозиції розрахунку необхідної довжини анкерування стрижнів у фібробетоні; [4] – оцінив вплив чинників на напруження в зоні контакту між стрижнями і бетоном, опрацював результати досліджень методом планування експерименту, отримав відповідні рівняння регресії на основі випробування; [5] – експериментальним шляхом та на основі повного чотирифакторного плану експерименту оцінив напруження у стрижнях за витягування зі сталевібробетону залежно від відносної довжини анкерування, класу бетону, витрат фібри і діаметра стрижнів; [6] – на основі результатів власних експериментальних досліджень розробив пропозиції,

щодо розрахунку міцності зчеплення f_b стрижневої арматури в сталеві фібробетони.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційних досліджень оприлюднено на: Міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» (Дубляни – Львів, 15-17 травня 2019 р.); XX Міжнародному науково-практичному форумі «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій» (м. Львів, ЛНАУ, 17-19 вересня 2019 року); Міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» (Дубляни – Львів 24-25 червня 2021 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села» (м. Львів, ЛНАУ, 16-17 червня 2022 року); XXIII Міжнародному науково-практичному форумі «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій» (м. Львів, ЛНУП, 4-6 жовтня 2022 року) додаток В.

Робота загалом доповідалась і отримала схвалення на засіданні кафедри будівельних конструкцій та науковому семінарі факультету будівництва та архітектури Львівського національного університету природокористування.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 6 наукових праць. Основні результати проведених досліджень містяться у статтях наукових журналів і збірників фахових спеціалізованих видань України, Матеріали дисертаційної роботи також висвітлено в тезах доповідей 5 міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури (142 найменувань) та 3 додатків. Дисертація викладена на 191 сторінці, з яких 154 сторінок основного тексту, 16 сторінок списку літератури, 5 сторінок додатків. До основної частини дисертації входить 53 рисунки і 59 таблиць на 30 повних сторінках.

1. СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз існуючих методів розрахунку зчеплення арматури з бетоном у залізобетонних конструкціях

Закономірності взаємодії арматури і бетону визначають особливість залізобетону як матеріалу. Цю взаємодію часто інтерпретують за допомогою теорії зчеплення, розвиток якої є своєрідним. Експериментальні дослідження зчеплення проводили десятки років тому, проводять їх і зараз, але теорія зчеплення лише вийшла зі стадії свого становлення. Кожне покоління вчених працює, використовуючи досвід усіх попередніх поколінь. Велика кількість дослідних даних потребує правильної та універсальної інтерпретації, а це не так просто у разі контактної взаємодії [2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 20; 21; 22; 23; 31; 32; 34; 35; 37; 38; 39; 58; 63; 65; 67; 70; 72; 73; 75; 76; 77; 78; 80; 81; 83; 88; 89; 90; 92; 97; 98; 99; 100; 101; 102; 103; 104; 106; 107; 108; 110; 111; 112; 113; 115; 116; 118; 120; 122; 127; 129; 130; 131; 133; 134; 137; 139; 140].

Питання зчеплення арматури періодичного профілю з бетоном вивчали Н. М. Мулін, С. О. Дмитрієв, Т. І. Астрова, Т. Г. Гараї, Т. Ж. Жунусов, О. О. Гвоздєв, які запропонували формулу для розрахунку необхідної довжини анкерування стрижневої арматури [7; 38; 39; 76; 77; 93].

Проблему оцінки зчеплення арматури з бетоном вивчали багато авторів, вагомий внесок у формування якої зробили і вітчизняні вчені Азізов Т. Н. [1], Бабич Є. М. [8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15;], Бамбура А. М. [16, 17], Бліхарський З. Я. [29; 30], Вахненко П. Ф. [31], Демчина Б. Г. [33; 44; 45], Журавський О. Д. [18; 19; 36; 40; 53; 54; 55; 56; 85], Карпюк В. М. [59], Кваша В. Г. [60, 74], Клименко Є. В. [31; 61], Клімов Ю. А. [62; 63; 105], Колчунов В. І. [17; 64; 65; 66], Кочкарьов Д. В. [14; 17; 67], Павліков А. М. [17; 79], Прокопович А. А. [81], Ромашко В. М. [84; 85; 86], Семко О. В. [91], Шмуклер В. С. [105] і багато інших.

Зчеплення арматури з бетоном залежить від великої кількості чинників, що суттєво впливає на деформування залізобетонних конструкцій. Тривалий процес проведення експериментально-теоретичних досліджень так і не сформував загальну теорію зчеплення арматури з бетоном. У чинних нормативних документах і сьогодні [41; 46; 52; 117] зчеплення арматури з бетоном оцінюється опосередковано із використанням емпіричних коефіцієнтів.

Аналіз досліджень з оцінки зчеплення арматури з бетоном допускає виокремити такі чотири напрями.

Перший напрям відображає такі основні параметри:

- профіль, геометричні та механічні характеристики арматури [39; 60; 62; 74; 85; 92; 94; 98; 101; 102; 106; 122; 138; 139];
- вид, склад та механічні характеристики бетону [7; 43; 47; 48; 49; 50; 68; 82; 87; 122];
- конструктивні характеристики армування залізобетонних елементів [9; 12; 24; 25; 51; 71; 83; 84; 95; 103; 129];
- вид і режим навантаження [30; 36; 40; 55; 56; 84; 98; 116; 117; 132; 135].
- технологічні параметри виготовлення та зберігання конструкцій [29; 43; 61; 69; 77];

Другий напрям відображав закономірності зчеплення арматури, пов'язуючи їх із нормальними напруженнями в ній та надалі відображав напруження зчеплення арматури з бетоном із взаємними зміщеннями [7; 96; 97; 137].

Третій напрям досліджень зчеплення арматури з бетоном став продовженням другого і започаткував певну модель зчеплення, враховуючи змінність в перерізах залізобетонних елементів уздовж контакту арматури з бетоном [64; 66; 78; 96; 97; 125].

Четвертий напрям досліджень зчеплення арматури з бетоном пов'язаний з числовим моделюванням, зокрема з використанням методу скінченних елементів [57; 58; 64; 66; 70; 125; 130; 136].

Зчеплення між арматурними стрижнями та бетоном є важливим чинником, який уможливорює існування залізобетонних конструкцій. Зусилля в зоні контакту стрижнів з бетоном зумовлюються адгезією, тертям по поверхні контакту і розклинюванням, спрямованим по нормалі до поперечних ребер стрижнів [137]. Розклинювальна сила виникає в результаті тиску поперечних ребер арматури на бетон, у результаті чого виникають конусоподібні і радіальні мікротріщини. Розвитку цих тріщин перешкоджає оточуючий бетон, який може бути посиленним фібровою арматурою, що призводить до заклинювання стрижнів і росту як радіальних зусиль, так і максимальних зусиль за витягування стрижнів з бетону.

Аналіз літературних джерел свідчить про відмінності у підходах щодо оцінювання розрахунком необхідної довжини анкерування арматурних стрижнів у бетоні [35; 37; 57; 60; 70; 76; 77; 78; 90; 97; 98; 128]. Наприклад, згідно з радянськими нормами [93], довжину анкерування арматури (табл. 1.1) визначали за формулою:

$$l_{an} = \left(\omega_{an} \frac{R_s}{R_b} + \Delta \lambda_{an} \right) d \geq \lambda_{an} d, \quad (1.1)$$

де d – діаметр арматурного стрижня; ω_{an} , $\Delta \lambda_{an}$, λ_{an} – коефіцієнти, що приймають залежно від умов роботи та профілю ненапруженої арматури; R_s – розрахунковий опір поздовжньої арматури розтягу для граничних станів; R_b – розрахунковий опір бетону для граничних станів I групи за міцністю на стиск.

Необхідну довжину анкерування стрижневої арматури в бетоні згідно з Єврокодом 2 [41; 52] (табл. 1.2) розраховують за формулою:

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min}, \quad (1.2)$$

де α_1 – враховує вплив форми стрижнів за умови необхідного захисного шару; α_2 – вплив мінімального захисного шару бетону; α_3 – стримувальний вплив поперечної арматури; α_4 – вплив одного або більше приварених

поперечних стрижнів вздовж розрахункової довжини анкерування l_{bd} ; α_5 – вплив поперечного тиску на площину розколювання уздовж розрахункової довжини анкерування; $l_{b,rqd}$ – базова довжина анкерування, яка враховує діаметр стрижня, розрахункові напруження у стрижні та граничні напруження зчеплення; $l_{b,min}$ – мінімальна довжина анкерування.

Порівнюючи дані табл. 1.1 і 1.2, можна зауважити, що розрахункові значення необхідної довжини анкерування стрижнів за Єврокодом 2 суттєво більші, ніж обчислені за СНиП.

Таблиця 1.1 – Необхідна розрахункова довжина анкерування стрижневої арматури класу А 400, розрахована за СНиП [93]

Діаметр стрижня, мм	Довжина анкерування, мм			
	Клас бетону			
	C12/15 B15	C16/20 B20	C20/25 B25	C25/30 B30
8	328	266	229	208
10	411	332	286	260
12	492	339	343	312
14	575	465	400	364
16	657	531	458	416

Результати досліджень, подані у праці [12; 72; 80; 121; 126], свідчать про те, що захисний шар бетону впливає на характер руйнування та значення граничних напружень зчеплення арматури з бетоном. За захисного шару бетону, що дорівнює діаметру стрижня ($c = d$), значення граничних напружень зчеплення знижують майже на 20% порівняно з такими значеннями за $c > 3d$, що необхідно враховувати за розрахунку анкерування арматури.

Згідно з результатами досліджень О. Є. Поляновської [80], довжина анкерування стрижнів l_b змінювалася в межах $l_b = 5d \dots 15d$. За $l_b = 10d$ і $15d$ граничні напруження зчеплення відрізнялися між собою не більше, ніж на 7%. За $l_b = 5d$ ця різниця сягала 40 ... 50%. Нормами ж встановлено мінімальну довжину анкерування $l_b = 10d$.

Таблиця 1.2 - Необхідна розрахункова довжина анкерування стрижневої арматури класу А 400, розрахована за Єврокодом 2 [52]

Діаметр стрижня, мм	Довжина анкерування, мм			
	Клас бетону			
	C12/15 B15	C16/20 B20	C20/25 B25	C25/30 B30
8	460	400	340	290
10	550	490	430	360
12	650	590	510	430
14	750	690	600	500
16	850	790	680	570

Дослідження М. В. Лобзіна, Д. Г. Гладишева, В. К. Шиндера [69] засвідчили, що за досягнення максимального значення дотичних напружень зчеплення, які розподіляються вздовж стрижня нерівномірно, зв'язок арматури і бетону зникає. Автори показали, що локальне послаблення зчеплення зумовлює перерозподіл напружень зчеплення вздовж осі стрижня.

У праці Є. А. Дмитренка [45] запропоновано аналітичну модель зчеплення арматури з бетоном, яка складається із замкнутої системи нелінійних рівнянь, два з яких є диференціальними рівняннями першого порядку. Проведено експериментальні дослідження зчеплення арматури з бетоном за деформаційних впливів і з урахуванням низхідної гілки деформування за різних видів навантажень. Численні дослідження з вивчення зчеплення арматури з бетоном, зміни довжини анкетування дали змогу отримати збіжність теоретичних і досліджуваних параметрів для визначення взаємних зсувів арматури щодо бетону за дії сил зчеплення і зовнішнього розтягувального зусилля.

1.2 Огляд закордонних досліджень зчеплення стрижневої арматури з бетоном і фібробетоном

Аналітичний огляд публікацій закордонних експериментально-теоретичних досліджень зчеплення арматурних стрижнів з бетоном і

фіробетоном характеризує аналогічний процес розвитку та вирішення даної проблеми.

Іспанські дослідники E. Garcia-Taengua, J. R. Marti-Vargas та P. Serna-Ros виконали експериментальні дослідження зчеплення арматурних стрижнів класу B 500 S діаметром 8, 16 і 20 мм за витягування їх із бетонних і сталевіробетонних призм (за вмісту фібри 40 і 70 кг/м³) з міцністю бетону-матриці на стиск 30 МПа [119; 121].

Використовували фібри зі загнутими кінцями двох типів: завдовжки 50 мм (відношення довжини до діаметра фібри – 80) і завдовжки 60 мм (відношення довжини до діаметра фібри – 65). У зразках змінним був також захисний шар бетону C (рис. 1.1), який брали рівним 30 мм, п'яти діаметрам стрижня і середньому значенню між ними. Розмір S брали не меншим за 200 мм.

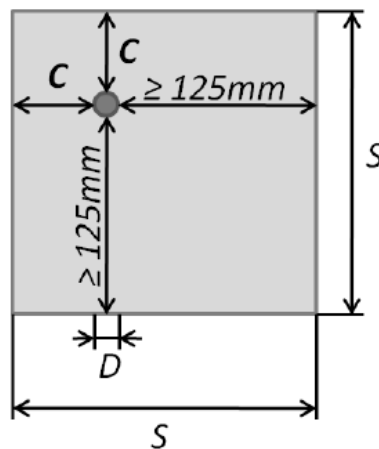


Рис. 1.1 – Схема розміщення арматурного стрижня [119; 121]

За витягування стрижнів (рис. 1.2) фіксували зусилля, що відповідають переміщенню його незавантаженого кінця на 0.01, 0.1 і 1 мм, і визначали середнє значення дотичних напружень τ_{av} за цих переміщень за стандартом UNE-EN 10080. Також визначали максимальне значення дотичних напружень τ_{max} і максимальне переміщення незавантаженого кінця стрижня s_{max} .

У цій праці вказано, що використання фібри завдовжки 60 мм (відношення довжини до діаметра фібри – 65) порівняно з фіброю завдовжки

50 мм (відношення довжини до діаметра фібри – 80) забезпечує отримання більших значень дотичних напружень на момент втрати зв'язку. Порівняно зі зразками без фібри її додавання за витрат 40 кг / м^3 , коли використовували фібру завдовжки 60 мм, максимальні напруження збільшилися на 21.0% – 47.8%, а s_{max} – не більше ніж на 10.3%.

За використання волокон завдовжки 50 мм пікові напруження збільшилися не більше ніж на 5,7%, а s_{max} збільшилися на 78.6 – 86.5%. Автори вказують також на те, що вміст фібри суттєво впливає на витягувальні зусилля, але для цього він має дорівнювати приблизно 1% від об'єму бетону.

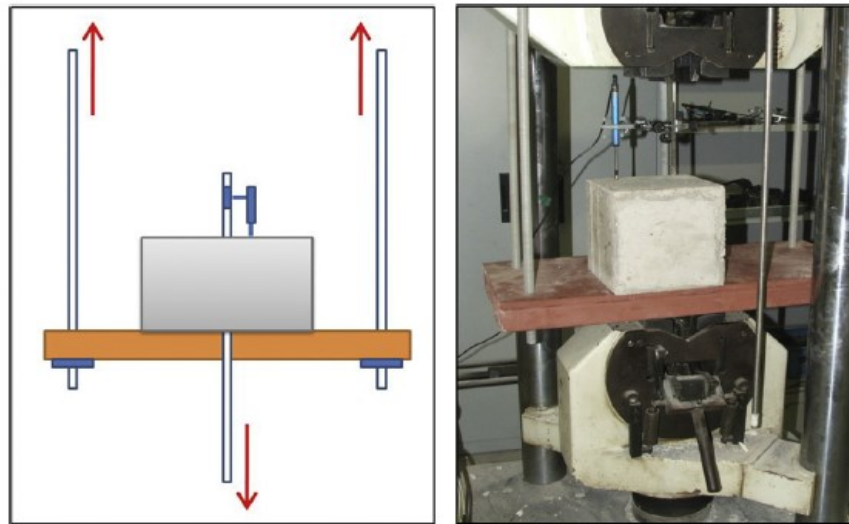


Рис. 1.2 – Випробування на витягування сталевих арматурних стрижнів із бетону і сталефібробетону [119; 121]

У цій праці показано, що за витягування стрижнів діаметром 20 мм з бетону без фібрового армування якщо захисний шар становить 30 мм, відбувалося розколювання зразка, що добре кореспондується з результатами, отриманими іншими дослідниками [126], які вказують на те, що сталеві волокна зменшують ризик розколювання захисного шару, сприяють підвищенню в'язкості руйнування за витягування стрижневої арматури з бетонних призм.

Е. Garcia-Taengua, J. R. Marti-Vargas і P. Serna у праці [120] висвітлили результати експериментальних досліджень анкерування стрижневої арматури класу В 500 S у бетоні прямокутних призм товщиною 200 мм. Факторами експерименту були: міцність бетону на стиск f_c (32, 48 і 44 МПа), діаметр стрижнів D (8, 12, 16 і 20 мм), захисний шар бетону C (відстань від бокової поверхні стрижня до двох найближчих сторін призми: від 20 до 100 мм), вміст фібрової арматури C_f (0, 40, 60, 70 кг/м³), відношення λ_f довжини фібри l_f до її діаметра d_f (45, 65 і 80) та довжина фібри l_f (35, 50 і 60 мм). Довжина закладання стрижнів у бетон прийнята $l_e = 5D$. Було випробувано 3 серії зразків, які відрізнялися міцністю бетону. У серіях змінними були параметри, подані вище. Сумарно випробувано 81 зразок.

Автори вказують на те, що за певних значень відношення товщини захисного шару бетону до діаметра стрижнів C/D відбулося у всіх чи окремих зразках розколювання призм, і максимальні напруження у стрижнях безпосередньо перед розколюванням визначити не вдалося.

Подальший аналіз результатів цих досліджень знайшов відображення у праці [119]. Зокрема, зазначено, що максимальні зусилля за витягування стрижнів зростають із підвищенням міцності бетону. Причому це найбільше впливає на міцність зв'язку між бетоном і стрижнями за інших рівних умов. Відзначається, що зі збільшенням діаметра арматури зростають максимальні дотичні напруження, оскільки поперечні ребра стрижнів більшого діаметра є вищими. Автори також вказують на те, що збільшення захисного шару бетону та вмісту фібри також позитивно впливають на максимальні дотичні напруження, але суттєво менше за вплив міцності бетону та діаметра стрижнів. Виявлено, що за інших рівних умов коротші волокна порівняно з довгими забезпечують підвищення максимальних дотичних напружень між стрижнями і бетоном. Автори отримали напівемпіричну формулу для визначення максимальних дотичних напружень:

$$\tau_{max} = 70.07 - 4.43f_c + 0.068f_c^2 + 0.026D^2 + 1.03\frac{C}{D} + \nabla_f C_f, \quad (1.3)$$

$$\text{де } \nabla_f = 0.51 - 0.0024\lambda_f - 0.0054l_f.$$

Bandelt M. J., Billington S. L. [108] досліджували анкерування стрижневої арматури діаметром 16 мм, з'єднаної внапуск задовжки 160 мм у середні прольоту балок, виконаних з бетону і сталевібробетону (рис. 1.3).

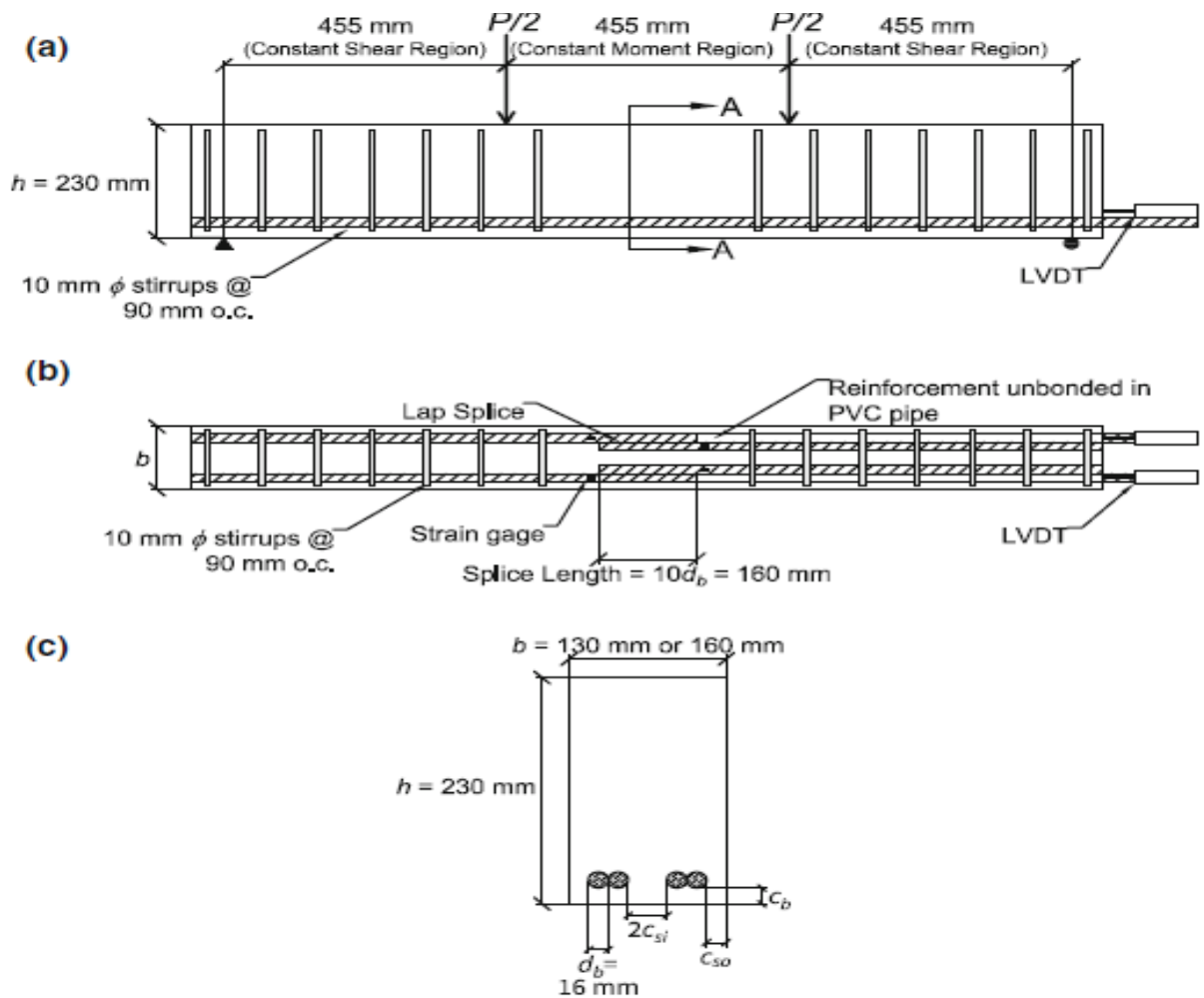


Рис. 1.3 – Геометрія досліджуваних зразків: (а) – вигляд збоку; (б) – вигляд зверху; (с) – розріз [108]

Експериментально встановлено, що за 1.5% фібрового армування максимальні дотичні напруження зчеплення під час руйнування у середньому були на 39% більшими, ніж у балках без фібри, а за 1.3% – на 33%. Автори вказують на те, що такий ефект дозволяє приблизно на 30% зменшувати довжину напуску стрижнів за комбінованого армування порівняно з

традиційним, а максимальні напруження зчеплення стрижнів визначати за формулою:

$$u = 0.78\sqrt{f'_c} \left(\frac{c+K_c}{d_b} \right) \leq 0.57\sqrt{f'_c}, \quad (1.4)$$

де f'_c - міцність бетону на стиск (МПа);

c – менше зі значень (боковий захисний шар, нижній захисний шар, пів відстані між стрижнями, що стикаються), мм;

$$K_c = \frac{0.45cV_fL}{d_f},$$

де V_f – об'ємна частка волокна;

L – довжина фібри, мм;

d_f - діаметр фібри, мм.

Narajli M. H., Namad B. і Karam K. [125] дослідили особливості анкерування стрижнів діаметром $d_b=16, 20, 25$ і 32 мм, з'єднаних внапуск у середині прольоту 32 балок (відстань між стрижнями – $6.5, 6.0, 12.0$ та 9.0 мм відповідно), виконаних із бетону міцністю на стиск 28 МПа (рис. 1.4).

Змінними параметрами в експериментах були також відношення товщини захисного шару бетону c до діаметра стрижня d_b ($c/d_b = 0.56, 0.88, 1.0, 1.34, 1.5$ і 2.0) і відсоток фібрового армування за об'ємом V_f ($V_f = 0; 0.5; 1.0; 2.0\%$). Сталева фібра зі загнутими кінцями мала довжину $L = 30$ мм і діаметр $d_f = 0.5$ мм.

За результатами випробувань балок встановлено, що максимальні дотичні напруження стрижнів балок без фібри:

$$u_{\max(\text{plain})} = 0.75\sqrt{f'_c} \left(\frac{c}{d_b} \right)^{2/3} \leq 0.57\sqrt{f'_c}, \quad (1.5)$$

а для комбіновано армованих балок:

$$u_{\max} = c_f u_{\max(\text{plain})}, \quad (1.6)$$

де $c_f = 1$ при $V_fL/d_f \leq 0.25$;

$$c_f = 1 + 0.34\sqrt{V_fL/d_f - 0.25} \text{ при } V_fL/d_f > 0.25.$$

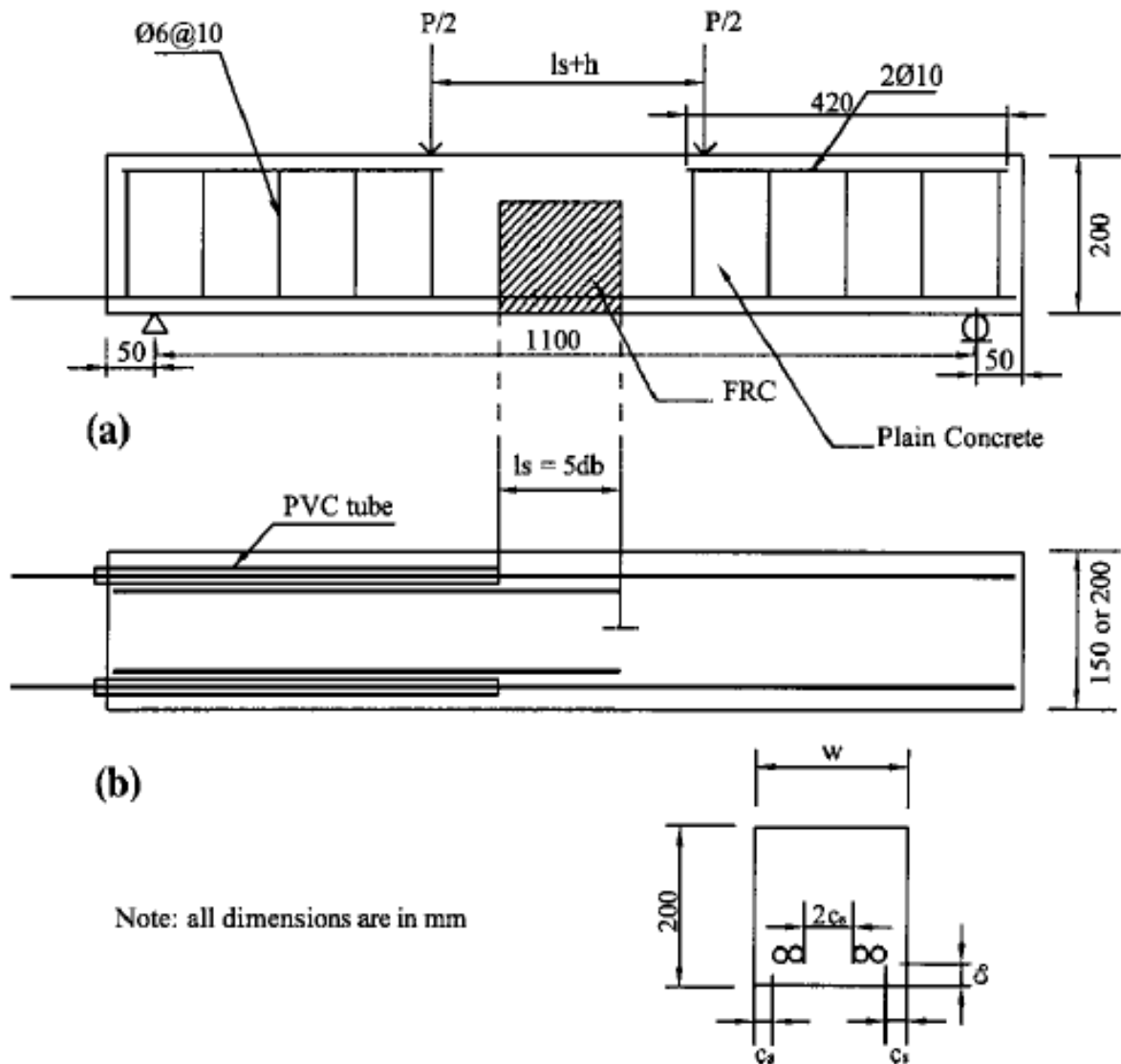


Рис.1.4 - Розміри та армування: (а) - вигляд збоку; (б) - вигляд знизу (розтягнута грань) [125]

Автори відзначили, що додавання 1 і 2% фібри за об'ємною часткою збільшило міцність зв'язку за витягування стрижнів у середньому на 26 та 33%.

Результати аналізу описаних робіт наводять на думку, що майбутні дослідження потрібно націлити на вивчення зчеплення з бетоном стрижнів малих діаметрів ($d < 10$ мм) а розширення діапазону довжин закладання стрижнів у бетон, щоб поліпшити уявлення про вплив цього параметра на поведінку зв'язку.

Narajli M. H. у працях [123; 124] висвітлив результати експериментально-теоретичних досліджень балок, армованих фіброю із загнутими кінцями завдовжки 30 мм і діаметром 0.5 мм фірми Dramix та стрижнями діаметром 20 і 25 мм, зістикованими у розтягнутій зоні з напуском 100 і 125 мм відповідно під дією циклічних навантажень. Відсоток армування фіброю за об'ємом дорівнював 1 і 2%. Виявилося, що фіброве армування забезпечило зростання міцності зв'язку порівняно з балками без фібри на 30 – 80%.

Shih-Но Chao, Antoine E. Naaman і Gustavo J. Parra-Montesinos [112] досліджували міцність зчеплення арматурних стрижнів діаметром 16 і 25 мм номінальною міцністю на розрив 420 МПа, закладених у призми 150 x 150 x 102 мм з бетону і сталевібробетону на довжину 102 мм, за дії циклічних навантажень. Випробовували також зразки, які містили сталеву спіральну арматуру з межею плинності 207 МПа і тимчасовим опором 317 МПа, насажену на арматурні стрижні, за її витрат, що дорівнюють 2% від об'єму бетону. Сталева фібра зі загнутими кінцями мала довжину 30 мм і діаметр 0.55 мм, Автори встановили, що армування фібровою арматурою за об'ємного вмісту фібри 2% забезпечило збільшення напружень зчеплення стрижнів з бетоном на 60% порівняно зі спіральним побічним армуванням. Кількість циклів завантаження вібробетонних зразків без погіршення жорсткості зв'язку була приблизно втричі більшою, ніж у спіральні армованих зразків.

Chu S. H., Kwan A. K. H. [114] досліджували зчеплення арматури класу HRB500 діаметром 12 мм із межею плинності 530 МПа і тимчасовим опором 663 МПа з бетоном і сталевібробетоном кубів із ребром 150 мм циліндричною міцністю 50.1 МПа. Довжина закладання стрижнів у бетон дорівнювала 50 мм. В експериментах використовували фібру з загнутими кінцями (рис. 1.5) якщо відсотки армування за об'ємом кубів становили від 0.2 до 1.6.

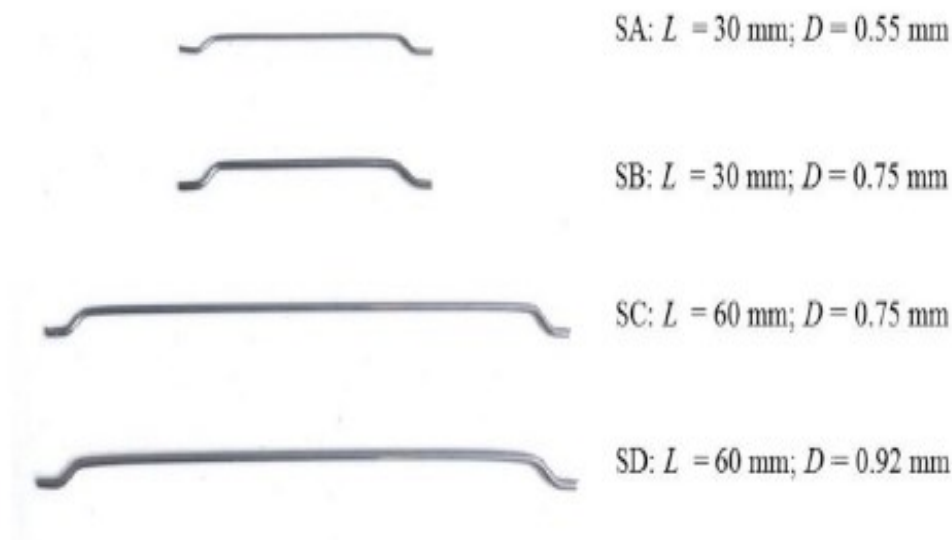


Рис. 1.5 – Геометричні розміри фібрової арматури [114]

Деформації на контакті «бетон-стрижень» вимірювали з боку завантаженого кінця. Результати експериментів засвідчили, що фіброве армування незначно повпливало на початок зсуву стрижнів, проте суттєвим був його вплив, залежно від геометрії фібри та її витрат, на максимальні напруження за повної втрати зчеплення. Наприклад, максимальні дотичні напруження за витягування стрижнів з бетону дорівнювали 16.74 МПа, а з бетону, армованого фіброю типу SC (рис. 1.5) за об'ємного відсотка армування 1.6% – 27.12 МПа.

Автори запропонували максимальні дотичні напруження за витягування стрижнів зі сталевібробетону τ_b визначати за формулою:

$$\tau_b = \tau_{b0}(1 + \alpha x^{0.7}), \quad (1.7)$$

де τ_{b0} – максимальні дотичні напруження за витягування стрижнів із неармованого бетону;

α – емпіричний коефіцієнт, який можна визначити шляхом регресійного аналізу;

x – відсоток фібрового армування за об'ємом.

Коефіцієнт α може мати значення в межах 0.21 – 0.40 за коефіцієнта детермінації R^2 в межах 0.712 – 1.000. Автори встановили, що він залежить від класу бетону і може визначатися за формулою:

$$\alpha = 0.0072f_c \quad (1.8)$$

Xuhui Zhang, Wei Zhang, Cuodong Cao, Fu Xu, Caiqian Yang [142] досліджували вплив намагнічування стрижня, до якого притягувалася фібра під час бетонування, на напруження під час витягування стрижня з тіла сталевібробетону. Встановлено, що збільшення інтенсивності магнітного поля до 30 мТ підвищило напруження за початку зсуву незавантаженого кінця стрижня в середньому на 28.2% і на 20.8% – максимальні напруження за витягування. Максимальний приріст цих напружень дорівнював 50%. Автори вказують, що за 1.5% фібрового армування від об'єму бетону приріст напружень у попередньо намагніченому стрижні на початку зсуву не спостерігався, тому рекомендують використовувати за такого способу вміст фібри в межах 0,25% – 0,75%.

1.3 Дослідження зчеплення арматурних стрижнів з фібробетоном

Сумісна робота бетону, фібробетону з арматурою потребує постійного вивчення та вдосконалення. На необхідну довжину анкерування впливає напружено-деформований стан бетону, фібробетону, в якому є арматура, профіль і діаметр арматурного стрижня, значення міцності арматури, наявність поперечної арматури та площа її перерізу, клас бетону, вид заповнювача для бетону, умови бетонування, захисний шар бетону, внутрішні напруження у бетоні тощо .

У національному стандарті [52] подано вимоги щодо необхідної довжини анкерування стрижневої арматури залежно від класу бетону. Анкеруванням стрижневої арматури у бетоні і фібробетоні займається Климов

Ю. А. [62; 63; 105], який рекомендує використовувати додаткове напилення для покращання щеплення. Є. М. Бабич у своїй статті [8; 11; 12] розкриває питання впливу захисного шару, діаметра арматури та порівнює розрахункові значення граничних напружень зчеплення арматури з бетоном.

У статті [134] за додавання сталеві фібри в бетонну суміш описано позитивний вплив фібри на сумісну роботу з арматурою та вплив таких чинників, як міцність сталі, діаметр анкера, коефіцієнт фібрового армування. Основою для випробування вищевказаних джерел на нормативного документу Eurocode 2 є методи висмикування та балковий метод [138].

Для визначення зчеплення сталеві арматури з залізобетонними зразками у вітчизняній практиці активно використовують метод висмикування арматури з бетонного зразка призматичної або циліндричної форми та метод витискання арматури з бетонного зразка [62; 103; 138].

Згідно з методиками [11; 62] за висмикування арматури із зразка призматичної або циліндричної форми (рис. 1.6 а, в) приймаються призми квадратного перерізу розміром 150x150 мм для діаметрів ≤ 20 мм і розміром 250x250 мм для діаметрів > 20 мм. Довжину призми ($l_{пр}$) визначають залежно від діаметра випробуваної арматури: $l_{пр} > 10d$ (d – діаметр стрижня). За витискання арматури із залізобетонного зразка (рис. 6б) приймаються призми квадратного перерізу розміром 150 x 150 мм для діаметрів арматури ≤ 20 мм та 250 x 250 мм для діаметрів арматури > 20 мм (для зразків циліндричної форми діаметр поперечного перерізу $D = 150$ мм для діаметрів арматури ≤ 20 мм та $D = 250$ мм для діаметрів арматури > 20 мм).

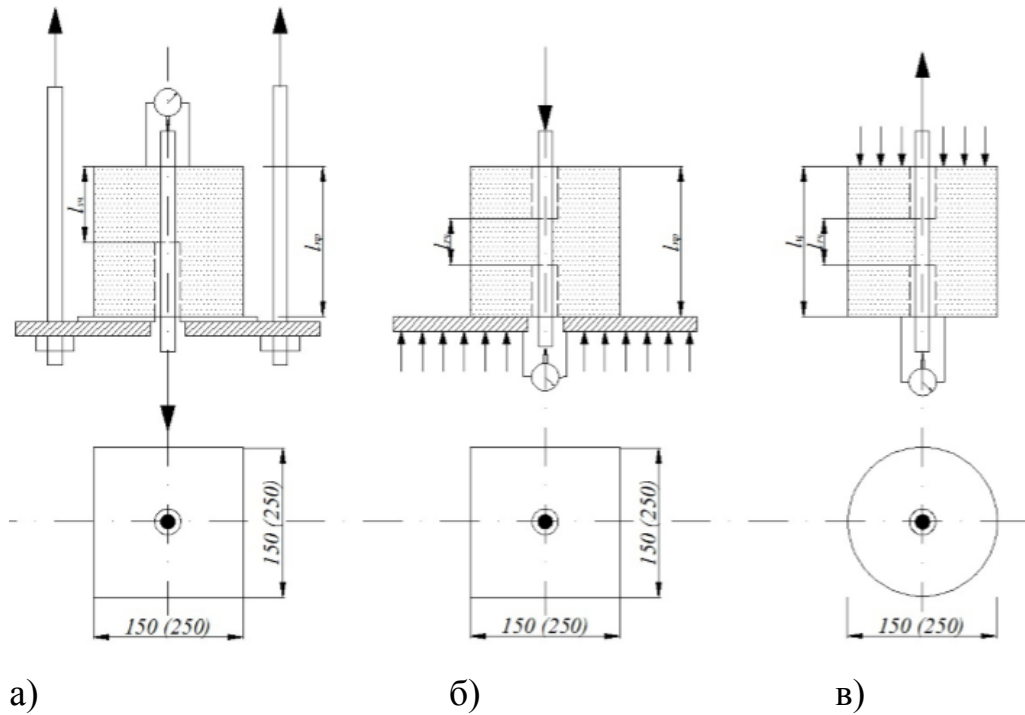


Рис.1.6 Схема випробувань методом: а) висмикування арматури з призматичного зразка; б) витискання арматури з призматичного зразка; в) висмикування з циліндричного зразка [62].

Балковий метод (рис 1.7), за якого зусилля навантаження діє на балку, в якій розтягувальне зусилля передається на арматурний стрижень. Балка складається з двох половинок, з'єднаних між собою арматурним стрижнем. У кожній з двох половинок довжина зчеплення арматури з бетоном - $10d$.

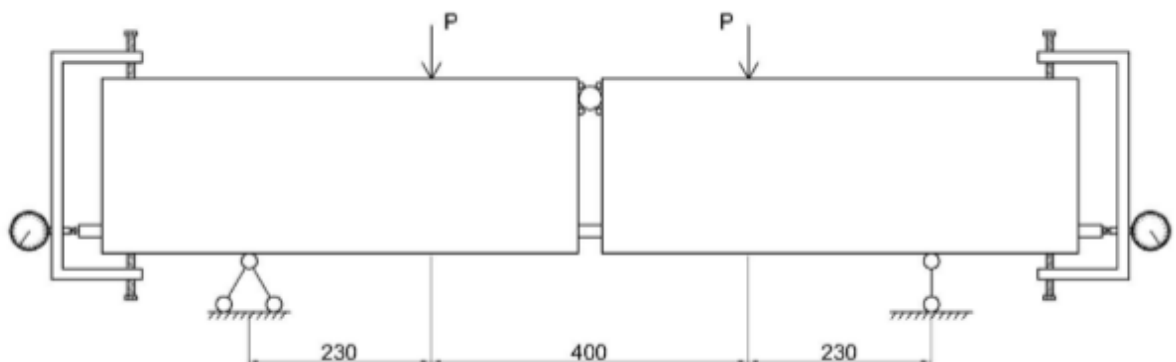


Рис. 1.7 - Схема випробувань дослідних зразків балковим методом [62].

Для визначення кращого зчеплення арматури у бетоні та фібробетоні згідно з рекомендаціями [138] вибрано метод висмикування та балковий метод [141].

Питання впливу форми поверхні фібрової арматури на зчеплення її з бетонною матрицею висвітлено у працях [22; 28; 109], в яких показано, що загнуті кінці фібри з дроту, профілювання поверхні фібри з відходів листопрокатного виробництва суттєво впливають на значення напружень у фібрі за її висмикування з бетону.

Однак єдиної методики розрахунку середніх дотичних напружень за повної втрати зчеплення між арматурою і бетоном поки немає. Крім того, фіброве армування мало б поліпшити зчеплення стрижнів з бетоном, однак методику розрахунку необхідної довжини анкерування для цього випадку наразі не розроблено.

У своїй роботі Чапюк О. С. [102] подає результати досліджень зчеплення стрижнів серпоподібного профілю діаметром 16 мм, зароблених на різну довжину у бетон призм різних класів міцності на осьовий стиск (рис. 1.8).

Автор показав, що нормальні і дотичні напруження за зсуву незавантаженого кінця стрижня на 0,2 мм прямо пропорційно залежать від призмової міцності бетону [102]. За результатами випробувань стрижнів на висмикування з бетону отримано залежність граничних напружень зчеплення f_b від середньої призмової міцності $f_{c,prism}$:

$$f_b = 0,3f_{c,prism}. \quad (1.9)$$

Результати досліджень, виконаних багатьма авторами, були проаналізовані свого часу в НДІЗБ, що дозволило встановити залежність між відносною завдовжки анкерування арматури періодичного профілю, напруженнями арматури під час висмикування і міцністю бетону [77; 97]:

$$\frac{l_{b,rq}}{\phi} = \eta \frac{\sigma_s}{f_{c,prism}}, \quad (1.10)$$

де $l_{b,rq}$ – довжина анкерування стрижня у бетоні; \emptyset – діаметр арматурного стрижня; σ_s – напруження у стрижні за межами довжини анкерування за висмикування з бетону; $f_{cm,prism}$ – призмova міцність бетону; η – коефіцієнт зчеплення арматури з бетоном, який для арматури періодичного кільцевого профілю дорівнює 0,6, а для гладкої арматури – 1.2.

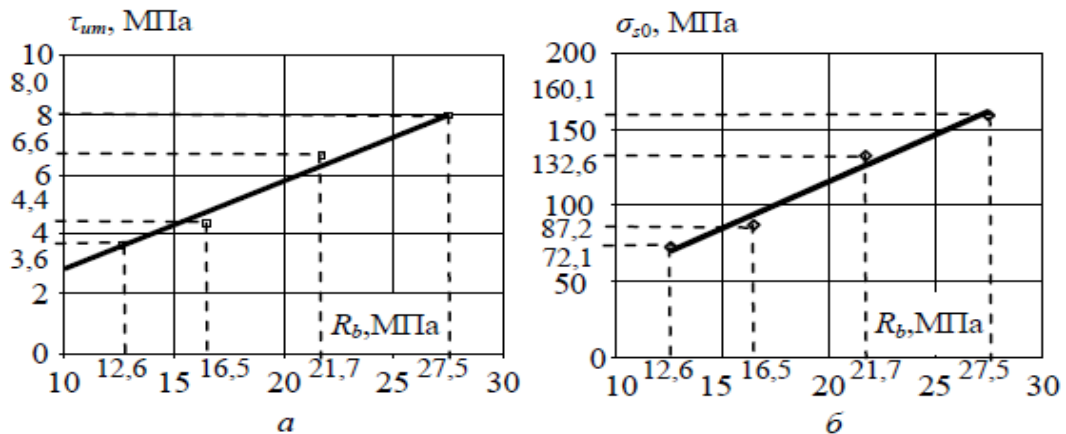


Рис. 1.8 Залежність граничних середніх дотичних напружень τ_{max} (а) та напружень у стрижнях σ_{s0} (б) від призмової міцності бетону R_b [102]

Згідно з Єврокодом 2 довжину заанкерювання арматури визначають, виходячи з рівності висмикувального зусилля і зусилля зчеплення стрижня з бетоном [27]:

$$l_{b,rq} = (\emptyset/4)(\sigma_s/f_b). \quad (1.11)$$

З урахуванням рівнянь (1) – (3) отримано:

$$\frac{l_{b,rq}}{\emptyset} = \frac{\sigma_s}{4(0,3f_{c,prism})} = \eta \frac{\sigma_s}{f_{c,prism}}. \quad (1.12)$$

З рівняння (4) отримуємо значення коефіцієнта $\eta = 0,83$. Таким чином, зчеплення арматури серпоподібного профілю порівняно з арматурою кільцевого профілю майже в 1,4 раза менше тому, що необхідна довжина анкерування арматури серпоподібного профілю на 30 – 50% більша порівняно з арматурою кільцевого профілю. На це звернули увагу у своїй роботі Семченков А. С. та Залесов А. С. [92].

Якість зчеплення арматури періодичного профілю, у т. ч. серпоподібного, геометричні характеристики якого показано на рис. 1.9, оцінюють індексом (коефіцієнтом), який у 1969 р. запропонував Рем [92; 94]:

$$f_R = \frac{k F_R}{\pi d c}, \quad (1.13)$$

де $k = 2$ – кількість вертикальних рядів поперечних ребер; F_R – проекція площі одного поперечного ребра на площину поперечного перерізу стрижня:

$$F_R = 0,25 h \pi d. \quad (1.14).$$

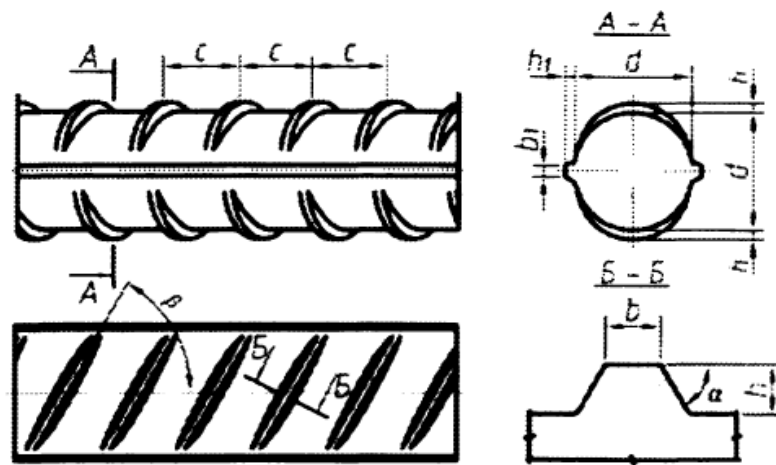


Рис. 1.9 – Арматура серпоподібного профілю

Вважають, що індекс Рема в межах 0,05 – 0,10 для арматури періодичного профілю є прийнятним з урахуванням достатнього зчеплення стрижнів із бетоном, допустимих прогинів, ширини розкриття тріщин, відсутності сколювань захисного шару бетону та поздовжніх тріщин.

За результатами вимірювань геометричних параметрів стрижнів серпоподібного профілю діаметрами 10, 14, 16, 18 і 22 мм автором [102] було визначено для них індекси Рема (відносна площа змінання поперечних виступів): 0,069; 0,071; 0,082; 0,076; 0,075 відповідно, що більше за мінімальне значення 0,056, встановлене ДСТУ 3760:2006 [101].

У праці А. С. Семченкова, А. С. Залесова [92] запропоновано методику розрахунку граничних напружень зчеплення залежно від схеми руйнування бетонних шпонок під поперечними ребрами профілю стрижня (рис. 1.10).

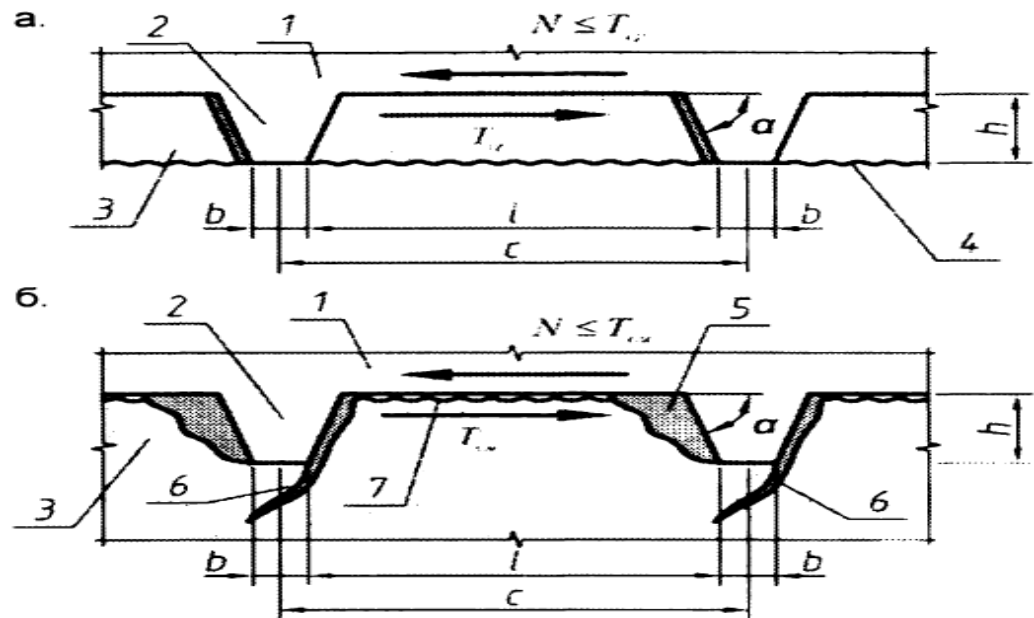


Рис. 1.10 – Руйнування шпонки за зсуву [92]: а – від зрізу; б – від зминання. Умовні позначення: 1 – арматура; 2 – поперечне ребро; 3 – бетон; 4 – поверхня зрізу; 5 – зони зминання бетону; 6 – поперечні тріщини від зминання; 7 – порушення адгезії; N – розтягувальне зусилля в арматурі на довжині з T_{cp} і T_{cm} – руйнівні зусилля від зрізу та зминання

Автори показали, що ці напруження залежать від геометричних параметрів профілю арматурного стрижня і від міцності бетону на розтяг за зрізу шпонок та від міцності бетону на стиск за зминання бетону під поперечними ребрами профілю. Показано, що для середніх класів бетону руйнування за зсуву стрижнів серпоподібного профілю відбувається через зминання, а за бетону класу C50/60 – через зріз шпонок. Суттєвого впливу діаметра стрижнів на граничні напруження їх зчеплення з бетоном не виявлено.

Циба О. О. [100] на основі результатів власних експериментальних досліджень та інших авторів показав, що граничні напруження зчеплення

можна визначити за формулою російського СП 52-101-2003, яка за структурою аналогічна до формули Єврокоду 2 і в якій коефіцієнт 2,25 замінено на коефіцієнти $\eta_1 = 5 + 20f_R$ для середніх значень і $\eta_1 = 1,5 + 20f_R$ для розрахункових із довірчим інтервалом 3S. Тоді, наприклад, формула для теоретичного оцінювання середньої міцності зчеплення стрижня діаметром до 32 мм із бетоном матиме вигляд:

$$f_b = (5 + 20f_R)f_{ctm}, \quad (1.15)$$

де f_{ctm} - середня міцність бетону на розтяг,

f_b обчислювали за формулами (1.9) і (1.15) за висмикування стрижня серпоподібного профілю діаметром 16 мм з бетону класу С 20/25 ($f_{ctm} = 2,2$ МПа, $f_{cm,prism} = 23,7$ МПа).

Виявилось, що f_b , обчислене за формулою (1.9), дорівнює 7,11 МПа, а за формулою (1.15) – 3,102 МПа. Розрахунки, результати яких подано у праці [92], засвідчили, що f_b дорівнює 1,68 МПа за висмикування стрижнів серпоподібного профілю діаметром від 10 до 40 мм з бетону класу С30/35. Причиною таких розходжень може бути неврахування у роботі під час зсуву стрижня участі значнішого об'єму бетону, що примикає до контактного шару. Усе це свідчить про необхідність пошуку досконаліших методик розрахунку міцності зчеплення арматури класу А500С з бетоном чи внесення уточнень у чинні методики.

Окреме питання, яке необхідно вивчити, – анкерування стрижнів серпоподібного профілю у бетоні, армованому фібровою арматурою українського масового виробництва. Зарубіжні дослідники у праці Garcia-Taengua E. [119] відзначають, що фіброве армування має суттєво менший вплив на зчеплення стрижнів із бетоном, ніж міцність бетону на стиск. Однак, відзначають, що зменшення довжини фібри за інших рівних умов позитивно впливає на зчеплення. Треба зазначити, що в цих дослідженнях використано доволі низькі витрати фібри на 1 м³ бетонної суміші (не більше за 70 кг / м³),

адже в реальних конструкціях відчутний силовий вплив волокон настає за витрат 55 – 140 кг / м³.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Закон зчеплення арматури з бетоном і фібробетоном встановити складно, це залежить як від багатьох характеристик самих матеріалів, так і від конструктивних та технологічних параметрів елементів і конструкцій. Діаграми зчеплення арматури з бетоном у кожному перерізі залізобетонного елементу змінюються по-різному, і тому їх не можна описати єдиною функцією.

2. Зусилля зчеплення арматури з бетоном доцільно розраховувати за допомогою середніх напружень зчеплення.

3. Факторами, які впливають на зчеплення стрижнів із бетоном та фібробетоном, є коефіцієнт фібрового армування, клас бетону, склад бетонної суміші, захисний шар бетону, діаметр і клас арматури [7; 43; 47; 48; 49; 50; 82; 87; 122].

4. Розрахунок міцності зчеплення стрижнів серпоподібного профілю з бетоном засвідчив необхідність пошуку нових підходів до точнішого врахування впливу як геометричних параметрів профілю арматури, так і міцності бетону, участі в роботі об'єму бетону, який безпосередньо прилягає до зони контакту.

Аналіз оприлюднених матеріалів досліджень інших авторів та подані висновки дозволили окреслити мету та завдання досліджень, які наведено у вступі.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [23-26; 72; 73].

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЯ ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ

Основою вивчення анкерування стрижневої арматури у фібробетоні та загалом проходження процесів взаємодії арматури в неоднорідному середовищі є експериментальні дослідження. Зважаючи на складність оцінки роботи контактних поверхонь у масиві фібробетону, експериментально визначаємо деформації поверхні фібробетонного елемента та переміщення кінців арматури. [22; 40; 71].

2.1 Обґрунтування методики досліджень

Метою програми досліджень є вивчення впливу міцності бетону, відносної довжини закладання стрижнів у бетон, вмісту фібри в одиниці маси бетону і діаметра стрижнів на дотичні напруження, що виникають у зоні контакту між стрижнями і бетоном.

Програма досліджень передбачала вирішення низки завдань, реалізація яких потребувала виготовлення дослідних зразків: бетонних кубів, призм, циліндрів коротких арматурних стержнів, призматичних елементів прямокутного перерізу для їх осьового завантаження та залізобетонних балок армованих стержневою арматурою [6; 11; 25; 26; 138].

Для вирішення поставлених завдань досліджень підготовлених зразків є випробування на витягування з них стрижнів арматури класу А500С за різних довжин закладання (відношення довжини анкерування стрижнів до їх діаметрів (8, 10, 12), міцності бетону (С20/25, С25/30, С30/35), діаметрів стрижнів (8, 10, 12 мм) і коефіцієнтів фібрового армування за об'ємом (0,007, 0,0125, 0,018), оптимізацію результатів досліджень методом планування експерименту та отримання відповідного рівня регресії.

З метою оптимізації кількості експериментальних зразків використаний метод планування експерименту. Тому для визначення дотичних напружень f_b використано повний чотирифакторний експеримент (ПФЕ 2⁴) для подальшого

отримання рівняння регресії, оскільки прийнята гіпотеза про приблизно лінійний вплив факторів на напруження [25; 26].

За фактори прийнято призову міцність бетону $f_{cm,prism}$, відносну довжину закладання стрижня у фібробетон l_b/\varnothing , коефіцієнт фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} і діаметр стрижнів \varnothing .

В експериментальних зразках відношення довжини анкерування стрижня до l_b/\varnothing призначені такими, щоб стрижні при витягуванні не розірвалися. Класи бетону вибрані такими, які найчастіше використовують у конструкціях без попереднього напруження бетону. Коефіцієнти армування фіброю призначені такими, які в основному використовують у несучих комбіновано армованих конструкціях. Діаметри стрижнів призначені такими, що можуть використовуватися в комбіновано армованих сталевібро-бетонних конструкціях із низьким вмістом стрижневого армування.

Граничні напруження зчеплення визначали із рівняння регресії ПФЕ 2⁴ [26]:

$$f_b = 10,2 + 1,45 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 0,97 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 0,16 \frac{\varnothing^{-10}}{2} + 0,14 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right). \quad (2.1)$$

Аналогічно оцінювали напруження у стрижнях за зсуву не завантаженого кінця 0,1 мм на основі рівняння регресії [26]:

На випадок, якщо б рівняння регресії ПФЕ 2⁴ незадовільно оцінювало експериментальні результати, виготовлено і випробувано додаткові зразки для побудови плану експерименту, близького до оптимального (D4). Для кожної точки експерименту випробувано по три зразки-близнюки.

Результати випробувань вказаних додаткових зразків оцінювали, використовуючи формулу (2.1).

Відношення експериментальних значень до теоретичних були в межах 1,01 – 1,05 [25]. Для порівняння з даними призовими зразками були виготовлені і випробувані зразки, які не містили фібри.

Плановий обсяг призових зразків, окреслених даними дослідженнями, поданий в таблиці 2.1 [25; 41].

Таблиця 2.1 - Програма експериментальних досліджень призмових зразків

№ п/п	Шифр зразків*	Клас бетону	Діаметр арматури, \varnothing_s мм	Довжина анкерування стрижневої арматури l , мм	Коефіцієнт фібрового армування за об'ємом ρ_{fv}
1	2	3	4	5	6
1	1.0P10.100.1***	C20/25	10	100	0
2	1.0P10.100.2***				
3	1.0P10.100.3***				
4	1.1PF8.64.1*		8	64	0,007
5	1.1PF8.64.2*				
6	1.1PF8.64.3*				
7	1.1PF8.96.1*				
8	1.1PF8.96.2*				
9	1.1PF8.96.3*				
10	1.1PF12.96.1*		12	96	
11	1.1PF12.96.2*				
12	1.1PF12.96.3*				
13	1.1PF12.144.1*				
14	1.1PF12.144.2*				
15	1.1PF12.144.3*				
16	1.2PF10.100.1**		10	100	0,0125
17	1.2PF10.100.2**				
18	1.2PF10.100.3**				
19	1.3PF8.64.1*		8	64	0,018
20	1.3PF 8.64.2*				
21	1.3PF8.64.3*				
22	1.3PF8.96.1*				
23	1.3PF8.96.2*				
24	1.3PF8.96.3*				
25	1.3PF12.96.1*		12	96	
26	1.3PF12.96.2*				
27	1.3PF12.96.3*				
28	1.3PF12.144.1*				
29	1.3PF12.144.2*				
30	1.3PF12.144.3*				
				144	

Продовження табл.2.1

1	2	3	4	5	6	
31	2.0P8.80.1***	C25/30	8	80	0	
32	2.0P8.80.2***					
33	2.0P8.80.3***					
34	2.0P10.80.1***		10			100
35	2.0P10.80.2***					
36	2.0P10.80.3***					
37	2.0P10.100.1***			120		
38	2.0P10.100.2***					
39	2.0P10.100.3***					
40	2.0P10.120.1***		12	120		
41	2.0P10.120.2***					
42	2.0P10.120.3***					
43	2.0P12.120.1***		10	100		0,007
44	2.0P12.120.2***					
45	2.0P12.120.3***					
46	2.1PF10.100.1**	C25/30	8	80	0,0125	
47	2.1PF10.100.2**					
48	2.1PF10.100.3					
49	2.2PF8.80.1**		10			120
50	2.2PF8.80.2**					
51	2.2PF8.80.3**					
52	2.2PF10.80.1**			12		120
53	2.2PF10.80.2**					
54	2.2PF10.80.3**					
55	2.2PF10.120.1**		10	100		0,018
56	2.2PF10.120.2**					
57	2.2PF10.120.3**					
58	2.2PF12.120.1**		12	120		
59	2.2PF12.120.2**					
60	2.2PF12.120.3**					
61	2.3PF10.100.1**	10	100	0,018		
62	2.3PF10.100.2**					
63	2.3PF10.100.3**					
64	3.0P10.100.1***	C30/35	10	100	0	
65	3.0P10.100.2***					
66	3.0P10.100.3***					

Продовження табл.2.1

1	2	3	4	5	6	
67	3.1PF8.64.1*	C30/35	8	64	0,007	
68	3.1PF8.64.2*					
69	3.1PF8.64.3*					
70	3.1PF8.96.1*					
71	3.1PF8.96.2*					
72	3.1PF8.96.3*					
73	3.1PF12.96.1*		12	96		
74	3.1PF12.96.2*					
75	3.1PF12.96.3*					
76	3.1PF12.144.1*					
77	3.1PF12.144.2*					
78	3.1PF12.144.3*					
79	3.2PF10.100.1**		10	100	0,0125	
80	3.2PF10.100.2**					
81	3.2PF10.100.3**					
82	3.3PF8.64.1*		C30/35	8	64	0,018
83	3.3PF8.64.2*					
84	3.3PF8.64.3*					
85	3.3PF8.96.1*					
86	3.3PF8.96.2					
87	3.3PF8.96.3*					
88	3.3PF12.96.1*	12		96		
89	3.3PF12.96.2*					
90	3.3PF12.96.3*					
91	3.3PF12.144.1*					
92	3.3PF12.144.2*					
93	3.3PF12.144.3*					

По три зразки-близнюки. Умовні позначення призмових зразків: 1.0P8.64.1. Перша цифра означає клас бетону: 1, 2, 3 – бетон класу C20/25, C25/30, C30/35 відповідно. Друга цифра означає об'ємний коефіцієнт армування: 0, 1, 2, 3 - $\rho_{fv} = 0; 0,007; 0,0125; 0,018$ відповідно. Наступні буквені позначення: P – призмові бетонні зразки, PF – призмові фібробетонні зразки. Перше число після буквеного позначення – діаметр стрижня в мм, друге число після буквенного позначення – довжина закладання стрижня в бетон чи фібробетон в мм. Остання цифра – номер зразка-близнюка. Одна зірочка * – зразки згідно з планом експерименту ПФЕ 2⁴ (48 шт). Дві зірочки ** – додаткові зразки для перевірки відповідності експериментальних і теоретичних даних, отриманих з рівняння регресії (24 шт). Три зірочки *** – зразки без фібри для порівняння з додатковими зразками (21 шт). Разом – 93 зразки.

Для оцінювання різниці між міцністю зчеплення f_b призмових зразків і балкового типу були виготовлені і випробувані фібробетонні та бетонні балки за методикою [138]. Програма експериментальних досліджень балкових зразків відображена в таблиці 2.2.

Балкові зразки вибрані на основі плану експерименту на базі призмових, близьких до оптимального (D4), для порівняння підготували по два зразки близнюки фіброзалізобетонні (1.2BF10.100.1, 2) балки. Крім цього, для оцінювання впливу фібрового армування на напруження зчеплення f_b було виготовлено по два зразки-близнюки (1.0B10.100.1.2), які не містили фібри.

Таблиця 2.2 - Програма експериментальних досліджень балкових зразків

№ п/п	Шифр зразків*	Клас бетону	Коефіцієнт фібрового армування за об'ємом ρ_{fv}	Діаметр арматури, \varnothing мм	Довжина анкерування стрижневої арматури l мм
1	2	3	4	5	6
1	1.2BF10.100.1**	C20/25	0,0125	10	100
2	1.2BF10.100.2**				
3	1.0B10.100.1		0		
4	1.0B10.100.2				
5	2.1BF10.100.1**	C25/30	0,007	10	100
6	2.1BF10.100.2**				
7	2.0B10.100.1		0		
8	2.0B10.100.2				
9	2.2BF8.80.1**	C25/30	0,0125	8	80
10	2.2BF8.80.2**				
11	2.0B8.80.1		0		
12	2.0B8.80.2				
13	2.2BF10.80.1**	C25/30	0,0125	10	80
14	2.2BF10.80.2**				
15	2.0B10.80.1		0		
16	2.0B10.80.2				
17	2.2BF10.120.1**	C25/30	0,0125	10	120
18	2.2BF10.120.2**				

1	2	3	4	5	6	
19	2.0B10.120.1	C25/30	0	12		
20	2.0B10.120.2		0,0125			
21	2.2BF12.120.1**					
22	2.2BF12.120.2**		0			
23	2.0B12.120.1		0,018	10		100
24	2.0B12.120.2					
25	2.3BF10.100.1**	C30/35	0	10	100	
26	2.3BF10.100.2**		0,0125			
27	2.0B10.100.1					
28	2.0B10.100.2		0			
29	3.2BF10.100.1**			0,0125		10
30	3.2BF10.100.2**					
31	3.0B10.100.1	0				
32	3.0B10.100.2					

Умовні позначення зразків аналогічні як у призматичних, тільки буквені позначення замінено на В – балкові залізобетонні та відповідно, BF – балкові фібро-залізобетонні зразки.

2.2. Матеріали та конструкція дослідних зразків

З метою розв'язати низку завдань, окреслених за даними дослідженнями, було заплановано виготовлення залізобетонних і залізофібробетонних дослідних зразків: кубів, циліндрів, призм, балок та призматичних елементів прямокутного перерізу для їх осьового завантаження.

Дослідні зразки виготовляли в лабораторних умовах Львівського національного університету природокористування.

Міцнісні та деформативні характеристики бетону, фібробетону і арматури в досліджуваних зразках контролювали за результатами випробування: кубів 10x10x10, 15x15x15, призм розмірами 10x10x40 см, 15x15x60 циліндрів 10*20, 15x30 та коротких арматурних стрижнів завдовжки 50 см [45; 46; 48; 49].

Як вихідні матеріали для виготовлення бетону і фібробетону та проведення досліджень було використано:

- портландцемент загальнобудівельного призначення ПЦ І-500Р-Н ПрАТ “Івано-Франківськцемент”;

- дрібний заповнювач – кварцовий пісок Жовківського родовища Львівської області (показники якості заповнювача наведено в табл. 2.3); пісок Жовківського родовища має дуже низький вміст органічних домішок та відповідає складу піску для важких бетонів, ДСТУ Б.В.2.7-32-95;

- крупний заповнювач – використано гранітний щебінь Вирівського родовища фракції 5-10 мм із насипною густиною 1380 кг/м³ та істинною густиною – 2,65 г/см³, без домішок глинистих і пилюватих, вміст зерен голчастої та пластинчастої форм менше від 11 %, а марка за дробильністю 1400, що задовольняє вимоги ДСТУ Б В.2.7-74-98 для виготовлення важких бетонів;

- суперпластифікатор С-3 – 0,3 % сухої речовини [42; 47; 66].

Наприклад для бетону:

С20/25 Ц:323кг П:578кг Щ:1235кг В:210кг Д:2,71кг

С25/30, Ц369; Щ:1237; П:521 В:215;

С30/35, Ц430; Щ:1208; П:484; В:221

Таблиця 2.3 – Показники якості дрібного заповнювача (пісок Жовківського родовища)

Зерновий склад						Модуль крупності Мк	Насипна густина кг/м ³	Воло- гість %	Вміст глинистих домішок %
діаметр вічок сит, мм									
5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16				
Часткові залишки на ситі, %									
2,1	1,4	1,6	30,2	53,6	11,1	2,1	1,46	3,5	0,6

Після виготовлення і дослідження пробних замісів проведено остаточний підбір бетонної суміші з метою максимального наближення до проєктного класу.

Під час виготовлення дослідних зразків ущільнення бетонної суміші після вкладання у підготовлені форми проводили на віброплощині. В однакових умовах і одночасно з основними зразками виготовляли та зберігали

контрольні куби, призми і циліндри, які виготовляли для кожного замісу проєктного складу таблиці 2.4.

Бетон і фібробетон дозрівали у камері нормального твердіння за таких умов – відносна вологість повітря $(90\pm 5)\%$ та температурі $(20\pm 3)^\circ\text{C}$, дослідні та контрольні зразки виготовляли з дрібнозернистого бетону трьох проєктних класів С20/25, С25/30, С30/35 та фібробетону із відсотком вмісту металевої фібри 0,7; 1,25; 1,8 відповідно [45; 47; 50] табл.2.5.

Випробування зразків проводили на тарованому пресі П-125 згідно із ДСТУ Б.В.2.7-214:2009 у віці 30-38 добу [46]. Міцність бетону, фібробетону на стиск визначали за результатами на стиск бетонних кубів розмірами 100x100x100, 150x150x150 та циліндрів $d=100*200$.

$$f_{c.cube} = \frac{(\alpha F)}{A}, \quad (2.2)$$

Призмову міцність та початковий модуль пружності визначали за стиску бетонних призм 100x100x400 і 150x150x600. Механічні характеристики бетону на розтяг визначали випробуванням призм 150x150x600 на згин, і розколюванням циліндрів $d = 100*200$ (табл. 2.4, 2.5, рис. 2.1 відповідно [1; 46; 48; 49]).

$$f_{c.tf} = \frac{(\delta l F)}{a b^2}, \quad (2.3)$$

$$f_{c.tn} = \frac{(\gamma 2F)}{\pi A}, \quad (2.4)$$

де F – руйнівне навантаження, Н; A – площа робочого перерізу зразка, мм^2 ; a – ширина поперечного перерізу призми, мм^2 ; b – висота поперечного перерізу призми, мм^2 ; l – відстань між опорами при випробуваннях зразків-призм на розтяг при згині, мм^2 ; α , γ , δ – масштабні коефіцієнти для приведення міцності бетону до міцності бетону в зразках базового розміру та форми.

Таблиця 2.4 – Мета та обсяг контрольних зразків

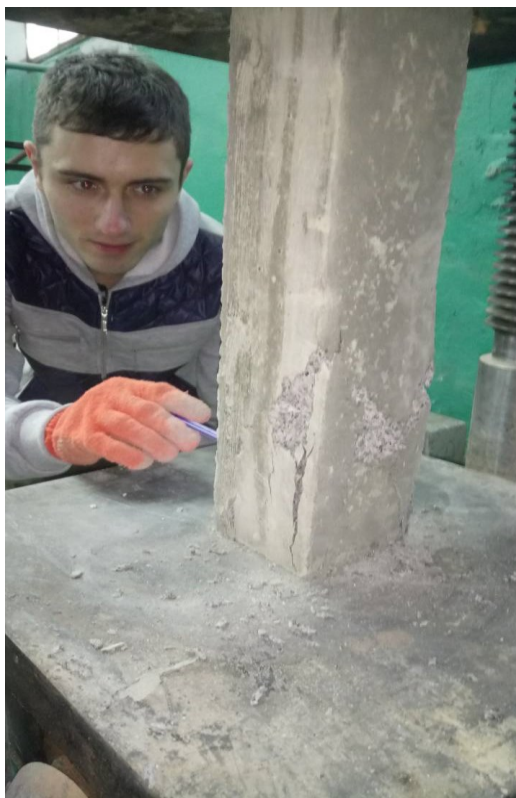
Тип та параметри контрольних зразків*	Кількість шт	Мета випробування зразків
Куби 100x100x100 мм	3	Міцність і модуль пружності стиснутого бетону на момент випробування основних зразків
150x150x150 мм	3	
Призми 150x150x600 мм	3	
циліндри d=100*200 мм	2	
Призми 150x150x600 мм	3	Міцність бетону на розтяг на момент випробування основних зразків
циліндри d=100*200 мм	2	

* - зразки для кожного проектного складу

Експериментально отримано середні значення механічних характеристик: для бетону класу С20/25 (середня кубова міцність $f_{cm,cube} = 32,71$ МПа, середня призмova міцність $f_{cm,prism} = 26,07$ МПа, середня міцність на розтяг $f_{ctm} = 2,34$ МПа, середній модуль пружності $E_{cm} = 31213$ МПа); для бетону класу С30/35 ($f_{cm,cube} = 44,33$ МПа, $f_{cm,prism} = 34,75$ МПа, $f_{ctm} = 2,83$ МПа і $E_{cm} = 34473$ МПа).

Таблиця 2.5 - Механічні характеристики бетону дослідних зразків

Клас бетону	Середнє значення кубової міцності, $f_{cm,cube}$, МПа	Середнє значення призмovoї міцності, $f_{cm,prism}$, МПа	Середнє значення міцності на розтяг, f_{ctm} , МПа	Середнє значення початкового модуля пружності, E_{cm} , МПа $\cdot 10^{-3}$
С20/25	32,71	26,07	2,34	31,21
С25/30	37,82	29,14	2,61	32,57
С30/35	44,33	34,75	2,83	34,47



а



б



в

Рис. 2.1 – Випробування контрольних зразків на механічні характеристики: а – призм на стиск; б – циліндрів на стиск; в – циліндрів на розтяг за розколювання.

Випробовували на розтяг три арматурні стрижні Ø8A500C (умовна межа плинності в середньому дорівнює 571 МПа, тимчасовий опір – 673 МПа), і три стрижні Ø12A500C (584 МПа і 689 МПа відповідно).

Основні фізико-механічні характеристики арматури визначали за випробування стрижнів завдовжки 50 см на розривній машині Р-20 з одночасним записом діаграми розтягу.

Усереднені значення досліджених характеристик подано в табл. 2.6 [66; 70].

Таблиця 2.6 – Механічні характеристики арматури А500С

№ п/п	Діаметр арматури d , мм	Кількість зразків шт	Площа арматури A_s , см ²	Умовна межа плинності $f_{0,2k}$, МПа	Тимчасовий опір розриву f_{uk} , МПа	Модуль пружності E_s , МПа·10 ⁵
1	8	6	0,503	571	673	2,088
2	10	6	0,785	563	668	2,094
3	12	6	1,131	584	689	2,096

Для виготовлення дослідних зразків призм і балок використовували ідентичні компоненти, що і для кубів, призм, циліндрів, а також із відповідним відсотковим вмістом сталеву анкерну фібру, виготовлену з низьковуглецевого дроту за ТУ У 28.7-05393145-004:2005 на підприємстві «Метизи-94» в м. Запоріжжя. Згідно із сертифікатом на фібру сталеву анкерну 50/1.0 мм, тимчасовий опір складає 1150 МПа, довжина – 50 мм, діаметр 1мм [42; 45; 50; 83].

Розміри призмових зразків планувались з умов лабораторного обладнання та забезпечення достатньої міцності та жорсткості фібробетонного масиву навколо арматури, для сприйняття ним радіальних зусиль, а також довжину зчеплення арматури забезпечували в пружній чи пластичній стадії її роботи.

Основні призмові зразки мали проєктні розміри 15x15x20 см, виготовлялись в горизонтальному положенні. У цих елементах стержень серпоподібного профілю діаметром 8, 10 чи 12 мм арматури класу А500С розміщався в центрі перерізу. В попередньо підготовлену фанерну опалубку з відповідними отворами під арматуру влаштовували арматурні стержні, на які в масиві опалубки з довшої сторони, влаштовували полімерні ущільнювачі залишаючи відкритою певну довжину поверхні арматури, тим самим забезпечуючи планову довжину анкерування l (64; 80; 96; 100; 120; 144 мм). Пошарово вкладали бетонну і фібробетонну суміш, ущільнюючи її на вібростолі отримували призмові зразки з випусками арматури з двох сторін для натягу і фіксації індикаторів (рис. 2.2. - 2.5).

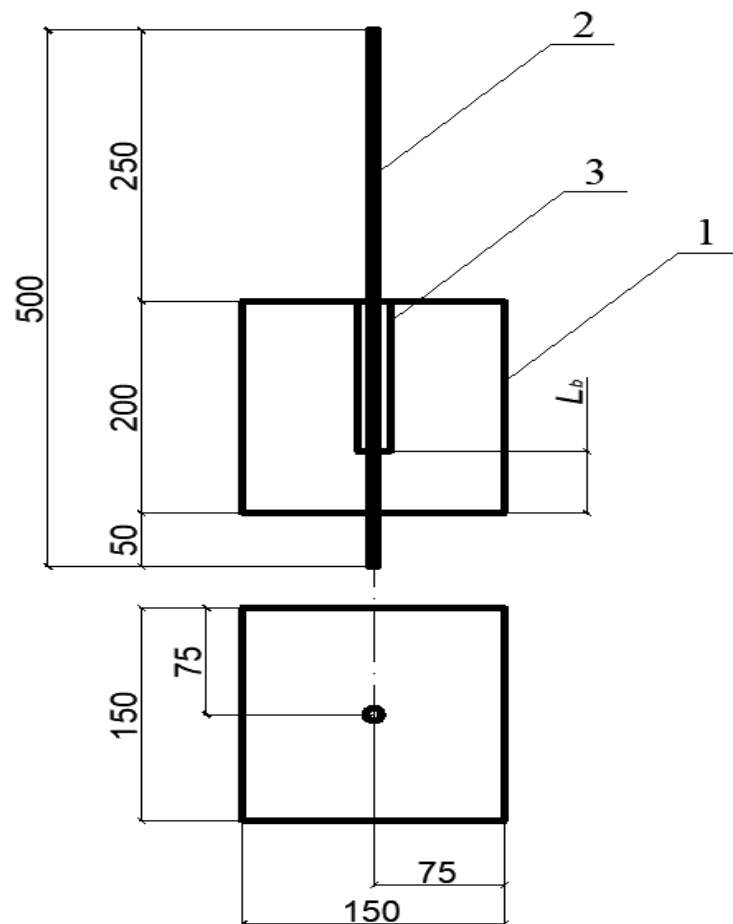


Рис. 2.2 – Схема призмового зразка: 1 – бетонна призма; 2 – арматура; 3 – полімерний ущільнювач



Рис. 2.3 – Підготовка форми для призмових зразків



Рис. 2.4 – Виготовлення призмових зразків



Рис. 2.5 – Готові призмкові зразки

Конструювання дослідних балок відбувалося в попередньо підготовленій опалубці розмірами $b = 120$ мм, $h = 220$ мм, $l = 1230$ мм. У середині опалубки у верхній її частині зробили виріз і влаштували шарнір у вигляді двох закладних деталей і сталевим циліндром між ними, а простір завтовшки 30 мм до низу опалубки заповнили екструдованим пінопластом. На висоті 30 мм від нижньої грані опалубки в її торцях посередині влаштували отвори відповідного діаметру, в які влаштували арматурні стрижні. Влаштовуючи арматуру, послідовно натягували на неї трубні ущільнювачі, які забезпечували рівні ділянки (l_1 , l_2 , l_3), забезпечуючи планову довжину анкерування. У кожній з двох половинок довжина зчеплення арматури з бетоном nd (8d, 10d, 12d), інша частина арматурного стрижня, окрім ділянки між балками, знаходиться в трубному полімерному ущільнювачі, який виключає зчеплення арматурного стрижня з бетоном чи фібробетоном (рис. 2.6).

Дослідні зразки залізобетонних і сталеві фібробетонних балок формували у фанерній опалубці в горизонтальному положенні, ущільнення бетонної

суміші відбувалося за умови використання глибинного вібратора (рис. 2.7, рис. 2.8).

Дозрівання бетону і фібробетону проходило за нормальних умов в лабораторії кафедри будівельних конструкцій. Підготовка всіх експериментальних зразків до випробувань розпочиналася лише після досягнення ними терміну 30 діб.

Балки мали поперечний переріз 120 x 220 мм, склалися з двох ділянок довжиною 600 мм і містили по одному стрижню з відстанню від його центру до центру шарніра 167 мм. Відстань від нижньої грані до центру стрижня дорівнювала 53 мм. Схему балки показано на рис. 2.6.

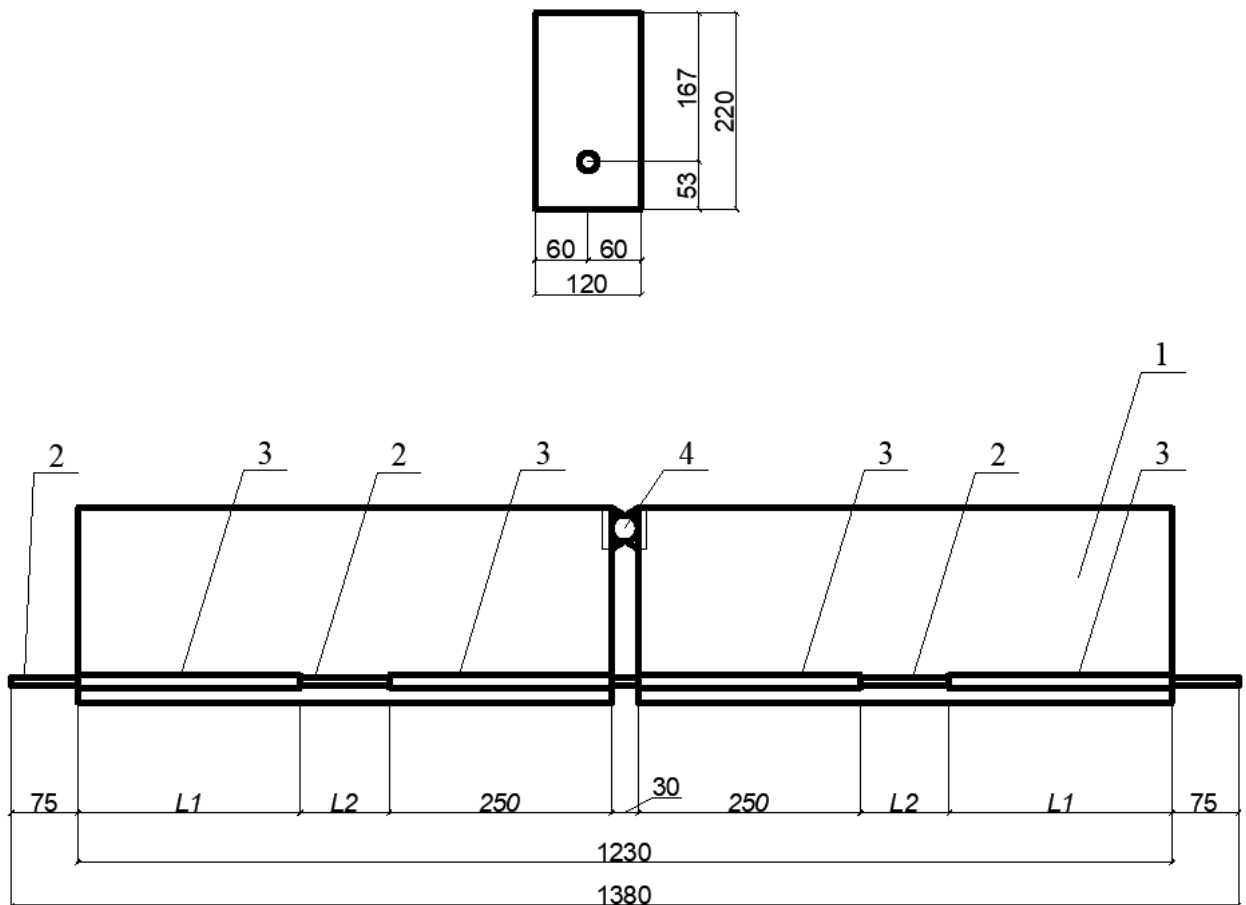


Рис. 2.6 – Конструкція балкових зразків: 1 – балка; 2 – арматура; 3 – полімерний трубний ущільнювач; 4 – шарнір



Рис. 2.7 – Опалубка підготовлена до бетонування



Рис. 2.8 – Виготовлення балкових зразків

2.3. Експериментальні дослідження призмових і балкових зразків

В експериментальних дослідженнях було застосовано три відомі методи, зокрема: 1 – метод висмикування арматури із залізобетонного чи фібробетонного зразка призматичної (циліндричної) форми; 2 – метод

витискання арматури у зразки; 3 – балковий метод. Пріоритетність у наших дослідженнях ми надавали першому та третьому методам, зважаючи на наявність обладнання та умови виконання експериментів.

Перший метод висмикування арматури з залізобетонного зразка призматичної (циліндричної) форми (рис. 2.9). Для випробування використали призми квадратного перерізу розміром 150 x 150 мм. Ділянка зчеплення арматурного стержня з бетоном розташована з боку докладання зусилля і має довжину nd (8d, 10d, 12d), висота призми становила 200мм.

Призмові зразки розглядалися як фрагменти центрально розтягнутих залізобетонних елементів. Завантаження проводили ступенями, які дорівнювали 1/10 від теоретично розрахованої несучої здатності, за наближення до переміщення стержня 0,01 мм ступені брали менші, щоб зафіксувати показник зусилля. Після 10-хвилинної витримки на кожному ступені навантаження знімали покази з мікроіндикатора та розривної машини встановлених індикаторів і контролювали послідовність утворення і розвитку нормальних тріщин (рис. 2.10) [11; 31; 71].

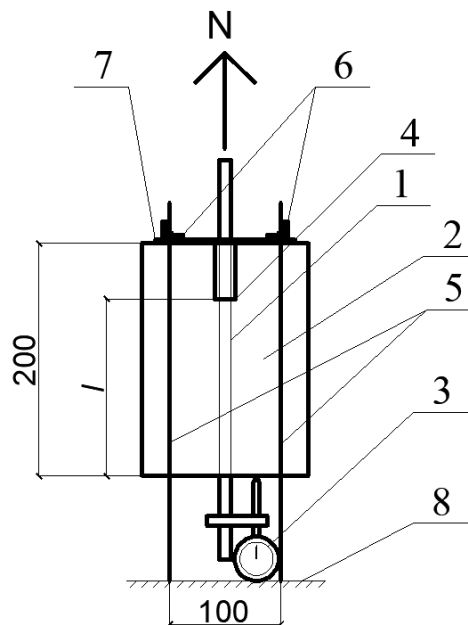


Рис. 2.9 – Схема випробування призмових зразків: 1 – арматура А500С; 2 – випробувальний зразок; 3 – мікроіндикатор; 4 – полімерний трубний ущільнювач; 5 – металеві шпильки $d = 12$ мм; 6 – металеві кутники; 7 – металева пластина; 8 – опорна плита.



Рис. 2.10 - Випробування призмових зразків

З метою детального вивчення розміщення фібри в зразках, розподілу деформацій і напружень за навантаження три зразки досліджували в комп'ютерному томографі (SE VITONE Ix M300) в університеті м. Краків Польща (AGH). Для проведення досліджень у призмових зразках колонкою навколо арматурного стрижня випилювали циліндр $d100$ мм, який надалі використовували як дослідний зразок. Вигляд зразків подано на рис. 2.11.

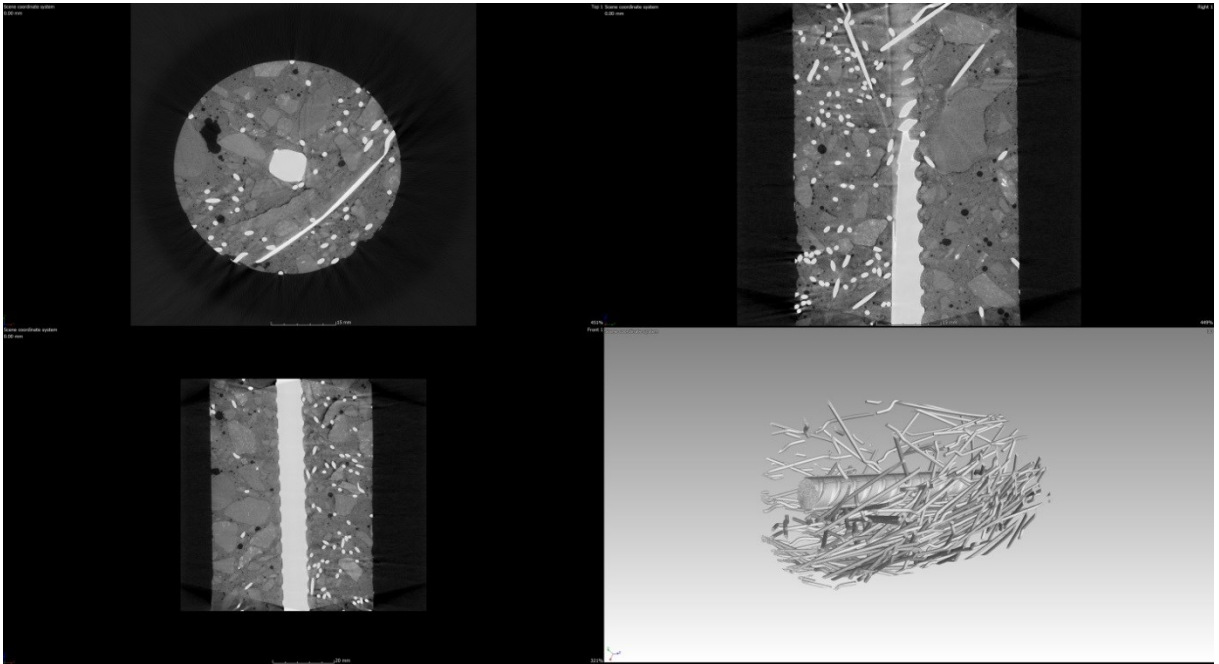


Рис. 2.11 – Загальний вигляд зразків у розрізі

Дослідні циліндричні зразки підлягали навантаженню витягуванню стержня із фібробетону. Розміщення фібри в зразку, розподіл напружень і деформацій відображено відповідно на рис.2.12, рис. 2.13 та 2.14.

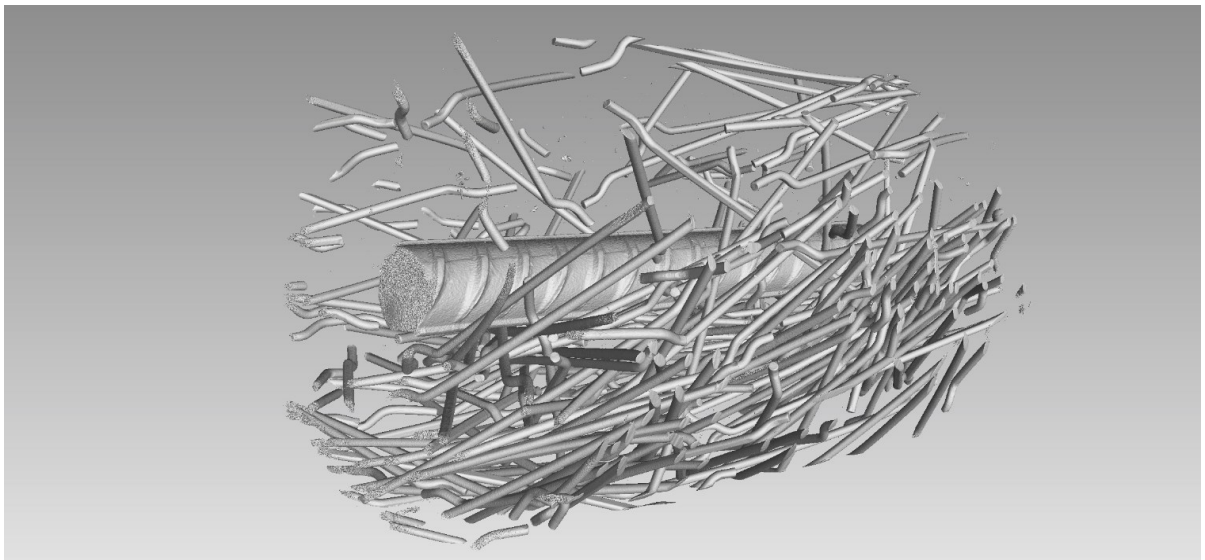


Рис. 2.12 – Розміщення фібри і арматури в зразку

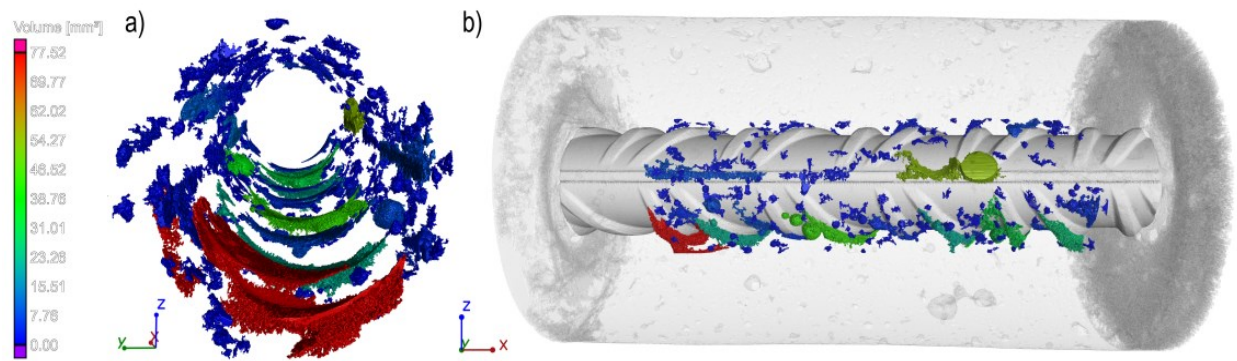


Рис. 2.13 – Розподіл напружень у зразку: а) в поперечному перерізі; б) по довжині стрижня

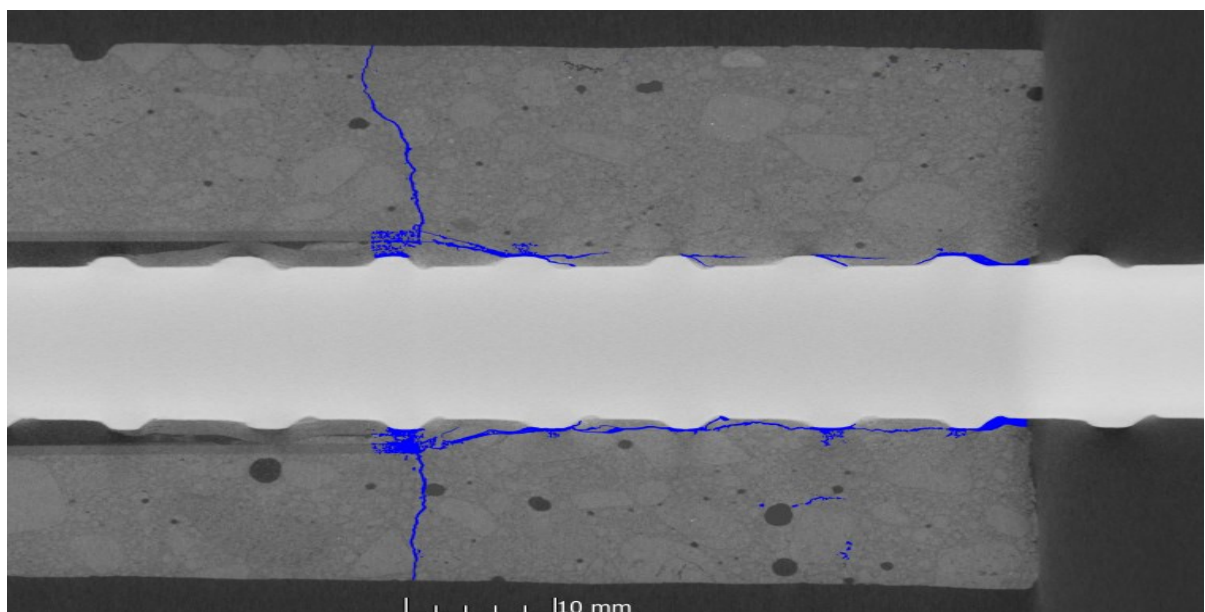


Рис. 2.14 – Вигляд зразків на контакті бетон арматура

Третій – балковий метод, за якого зусилля навантаження діє на балку, в якій розтягувальне зусилля передається на арматурний стрижень. Балка складається з двох половинок, з'єднаних між собою арматурним стрижнем. Цей метод, на відміну від методу на висмикування (втискання), не є таким ідеалізованим, і більше відповідає реальним умовам. Балковий метод оцінювання зчеплення арматури з бетоном є основним методом в Eurocode 2, і його можна використати для всіх видів арматурних стрижнів [11; 24; 31; 59; 81].

Балки випробовують двома зосередженими силами. Робочий проліт балки дорівнював 860 мм, а відстань між зосередженими силами,

прикладеними до балки, – 400 мм. У процесі випробувань вимірювали переміщення розташованих на торці балок вільного кінця дослідного стрижня. Схему випробувань балок наведено на рис. 2.15.

Завантаження зразків здійснювали ступенями по 0.1 від передбачуваного граничного навантаження висмикування арматурного стержня з бетону. Навантаження контролювали кільцевим динамометром. Зсув вільних кінців випробувального арматурного стрижня вимірювали індикатором з границею вимірювання 1 мм і точністю 0,001 мм. На кожному ступені навантаження витримуються 10 хв, під час яких знімаються показання приладів (рис. 2.16, 2.17).

В процесі проведення експериментальних досліджень балок, завантажуючи їх двома зосередженими силами, на кожній ступені знімали покази прогину балок, розмістивши під зосередженими силами на рамі індикатори. За показниками динаміки приросту прогинів кожної балки оцінювали зміни деформації в арматурі та показники несучої здатності балок аж до руйнування (рис. 2.17 та рис. 2.18).

Витягувальне зусилля, яке виникає у стрижні, обчислювали за формулою:

$$N = \frac{M}{z}, \quad (2.4)$$

де M – згинальний момент у середині прогону балкового зразка;

z – плече пари сил, яке дорівнює відстані між віссю дослідного стрижня і віссю циліндра в стиснутій зоні.

Дотичні напруження (середні напруження зчеплення) між дослідним стрижнем і бетоном обчислювали за формулою:

$$\tau = \frac{N}{ul}, \quad (2.5)$$

де $u = \pi\emptyset$ – периметр поперечного перерізу стрижня; l – довжина закладання стрижня у бетон чи фібробетон.

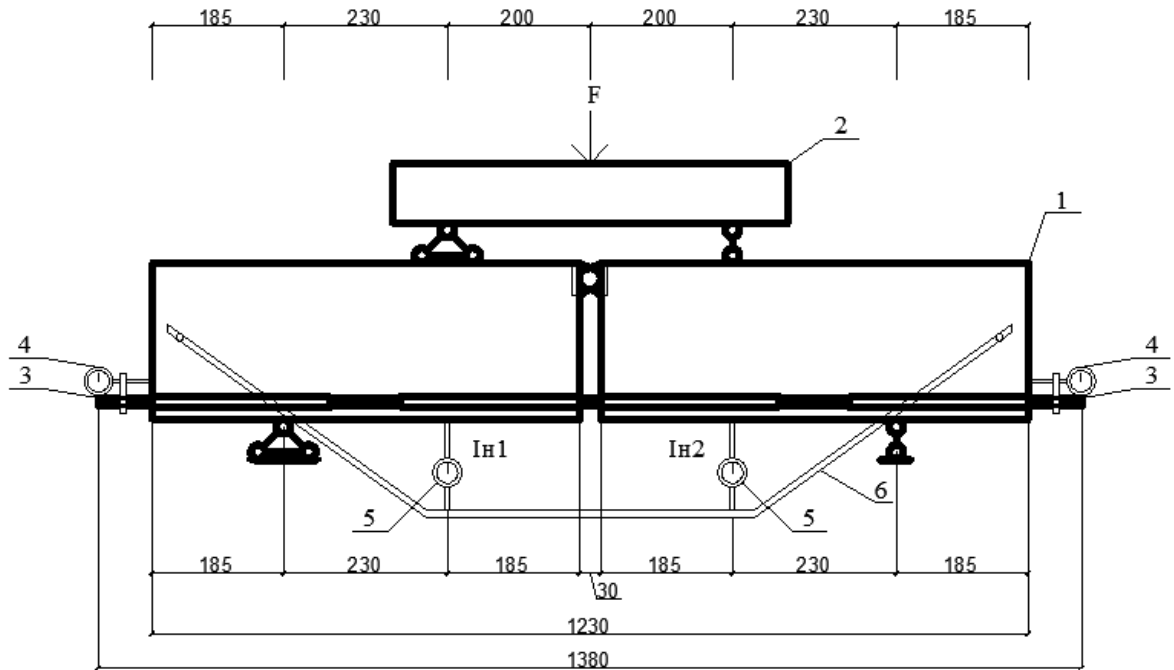


Рис. 2.15 – Схема випробувань балок: 1 – дослідна балка; 2- траверса; 3- арматура; 4-мікроіндикатори; 5-прогиноміри; 6-металефа ферма.



Рис. 2.16 – Загальний вигляд робочого стенда при випробуванні балочних зразків



Рис. 2.17 – Зняття показів на дослідному зразку



Рис. 2.18 – Вигляд дослідної балки при дії руйнівного навантаження

Динаміка приросту прогинів балок давала змогу оцінювати показники деформації в арматурі та несучу здатність балок.

2.4. Висновки до розділу 2

За результатами експериментальних досліджень призмових та балкових зразків, було виявлено, що армування сталевую фіброю українського масового виробництва збільшує зчеплення арматури з фібробетоном.

Отримані нові експериментальні дані щодо зчеплення арматури серповидного профілю залежно від її діаметру, міцності бетону та проценту фібрового армування й визначено залежності між дотичними максимальними напруженнями в стержнях і діаметром арматури та міцністю бетону, фібробетону.

Зі збільшенням міцності фібробетону зчеплення стрижневої арматури серповидного профілю з фібробетоном збільшується пропорційно росту міцності.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [23-26].

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ А500С У ФІБРОБЕТОНІ ЗРАЗКІВ ПРИЗМОВОГО ТИПУ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Розвиток зсувів незавантажених кінців стрижнів за витягування зі зразків призмового типу

На кожному ступені навантаження вимірювали зміщення незавантаженого кінця стрижня відносно торця зразка призмового типу. У табл. 3.1 подано середні значення зусиль на початку зсуву N_{S0} , за зсуву 0,1 мм $N_{S0,1}$ (умовне граничне витягувальне зусилля, за яким визначалося граничне напруження зчеплення f_b) і максимальні зусилля для трьох зразків-близнюків. Перші шістнадцять позицій таблиці містять дані щодо результатів випробувань зразків згідно з матрицею планування повного чотирифакторного експерименту 2^4 . Наступні вісім позицій містять дані щодо результатів випробувань зразків, які б доповнили вказану матрицю, у разі необхідності використання трирівневого плану експерименту, близького до D-оптимального, типу B_4 , якщо рівняння регресії згідно з матрицею планування повного чотирифакторного експерименту 2^4 були б неадекватними. Нижня частина таблиці 3.1 містить дані випробувань стрижнів на витягування з бетонних призм, що дозволяє оцінити вплив кількості фібри на витягувальні зусилля порівняно зі зразками, які її не містять.

За закладання стрижнів діаметром 12 мм на довжину 144 мм (12Ø) у бетон класу С30/35 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 34,75$ МПа, армований сталеву фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,018 (зразки 3.3PF12.144), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 41,35$ кН (рис. 3.1). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 70,35$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 78,18$ кН. Вказані зусилля для зразків 3.1PF12.144 з коефіцієнтом фібрового

армування по об'єму 0,007 дорівнювали 34,16кН, 58,19кН і 68,32кН відповідно.

Таблиця 3.1 – Експериментальні значення витягувальних зусиль

Марка зразка	Витягувальні зусилля на початкові зсуву N_{S0} , кН	Витягувальні зусилля за зсуву 0,1 мм $N_{S0,1}$, кН	Максимальні витягувальні зусилля N_{Smax} , кН	$\frac{N_{S0,1}}{N_{S0}}$	$\frac{N_{Smax}}{N_{S0,1}}$
3.3PF12.144	41,35	70,35	78,18	1,701	1,111
3.3PF8.96	17,83	30,33	33,86	1,702	1,116
3.1PF12.144	34,16	58,19	68,32	1,703	1,174
3.1PF8.96	14,73	25,09	29,45	1,703	1,174
3.3PF12.96	27,57	46,90	55,13	1,701	1,175
3.3PF8.64	11,88	20,22	23,76	1,702	1,175
3.1PF12.96	22,77	38,80	45,54	1,704	1,174
3.1PF8.64	9,82	16,73	19,52	1,704	1,167
1.3PF12.144	31,02	52,78	62,04	1,701	1,175
1.3PF8.96	13,37	22,75	26,65	1,702	1,171
1.1PF12.144	25,63	43,66	51,25	1,703	1,174
1.1PF8.96	11,05	18,82	21,99	1,703	1,168
1.3PF12.96	20,68	35,19	41,36	1,702	1,175
1.3PF8.64	8,92	15,17	17,73	1,701	1,169
1.1PF12.96	17,08	29,11	34,17	1,704	1,174
1.1PF8.64	7,37	12,55	14,60	1,703	1,163
1.2PF10.100	16,56	27,60	32,48	1,667	1,177
2.1PF10.100	17,93	30,98	35,85	1,728	1,157
2.2PF8.80	12,13	20,87	22,64	1,721	1,085
2.2PF10.80	15,78	28,94	32,20	1,834	1,113
2.2PF10.120	23,52	36,30	44,69	1,543	1,231
2.2PF12.120	27,28	46,38	54,56	1,700	1,176
2.3PF10.100	21,40	35,60	41,10	1,664	1,154
3.2PF10.100	22,43	36,42	42,99	1,624	1,180
1.0P10.100	13,12	24,00	26,24	1,829	1,093
2.0P10.100	15,32	25,73	30,27	1,680	1,176
2.0P8.80	9,29	14,95	17,59	1,609	1,177
2.0P10.80	12,24	20,68	24,33	1,690	1,176
2.0P10.120	18,13	29,35	34,53	1,619	1,176
2.0P12.120	21,24	34,39	40,45	1,619	1,176
3.0P10.100	17,72	29,39	34,97	1,659	1,190
Результати подано як середні для трьох зразків-близнюків					

За закладання стрижнів діаметром 12 мм на довжину 144 мм (12Ø) у бетон класу C20/25 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 26,07\text{МПа}$, армований сталеву фібру з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,018 (зразки 1.3PF12.144), зміщення розпочалося при зусиллі $N_{S0} = 31,02\text{кН}$. Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 52,78\text{кН}$, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 62,04\text{кН}$. За випробування зразків 1.1PF12.144 ці зусилля дорівнювали 25,63кН, 43,66кН і 51,25кН відповідно.

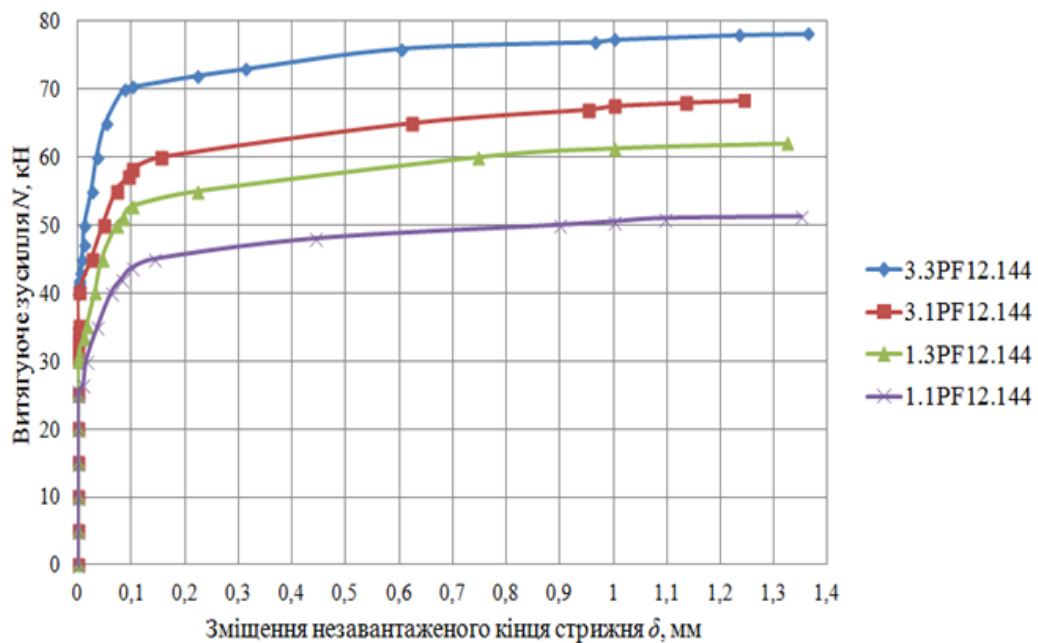


Рис. 3.1 –Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для призмових зразків 3.3PF12.144, 3.1PF12.144, 1.3PF12.144 і 1.1PF12.144

Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 3.3PF12.144, 3.1PF12.144, 1.3PF12.144 і 1.1PF12.144 дорівнювали в середньому 1,362 мм, 1,242 мм, 1,323 мм і 1,351 мм відповідно. Експериментальні дані засвідчили, що якоїсь залежності між зміщеннями незавантажених кінців стрижнів, що відповідали максимальним зусиллям, і міцністю бетону чи вмістом фібри не спостерігалось.

За закладання стрижнів діаметром 8 мм на довжину 96 мм (12Ø) у бетон класу С30/35 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 34,75$ МПа, армований сталеву фібру з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,018 (зразки 3.3PF8.96), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 17,83$ кН (рис. 3.2). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 30,33$ кН, а максимальне зусилля при витягуванні стрижня $N_{Smax} = 33,86$ кН. Вказані зусилля для зразків 3.1PF8.96 з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,007 дорівнювали 14,73кН, 25,09кН і 29,45кН відповідно.

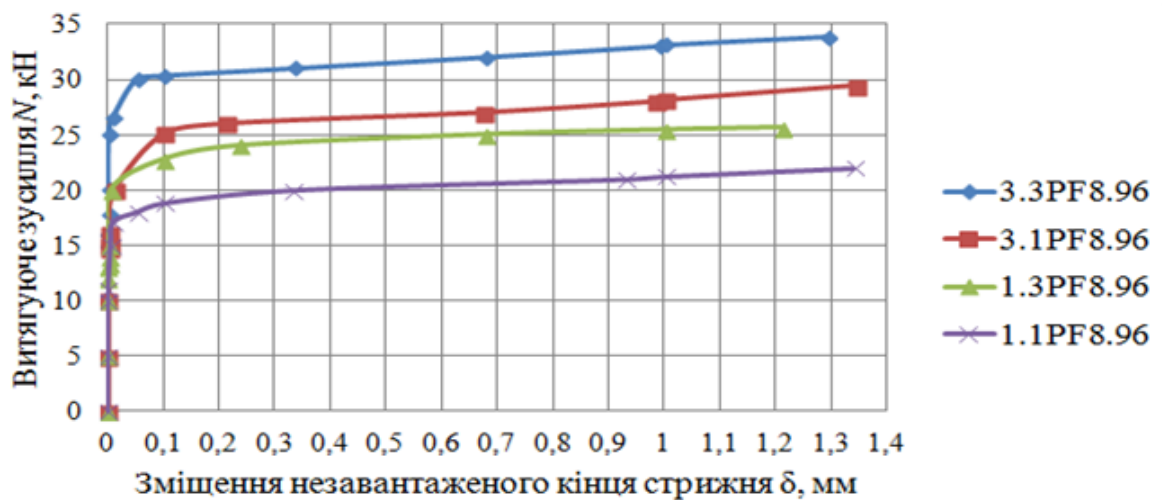


Рис. 3.2 –Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для призмових зразків 3.3PF8.96, 3.1PF8.96, 1.3PF8.96 і 1.1PF8.96

За закладання стрижнів діаметром 8 мм на довжину 96 мм (12Ø) у бетон класу С20/25 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 26,07$ МПа, армований сталеву фібру з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,018 (зразки 1.3PF8.96), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 13,37$ кН. Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 22,75$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 26,65$ кН. За випробування зразків 1.1PF8.96 ці зусилля дорівнювали 11,05кН, 18,82кН і 21,99кН відповідно.

Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 3.3PF8.96, 3.1PF8.96, 1.3PF8.96 і 1.1PF8.96 дорівнювали в середньому 1,293 мм, 1,346 мм, 1,211 мм і 1,340 мм відповідно. Цікаво зауважити, що ці зсуви у зразках із вмістом фібри 1,8% від об'єму бетону були меншими, ніж за відсотка армування 0,007.

За закладання стрижнів діаметром 12 мм на довжину 96 мм (8Ø) у бетон класу С30/35 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 34,75$ МПа, армований сталеву фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,018 (зразки 3.3PF12.96), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 27,57$ кН (рис. 3.3). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 46,90$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 55,13$ кН. Вказані зусилля для зразків 3.1PF12.96 із коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,007 дорівнювали 22,77 кН, 38,80 кН і 45,54 кН відповідно.

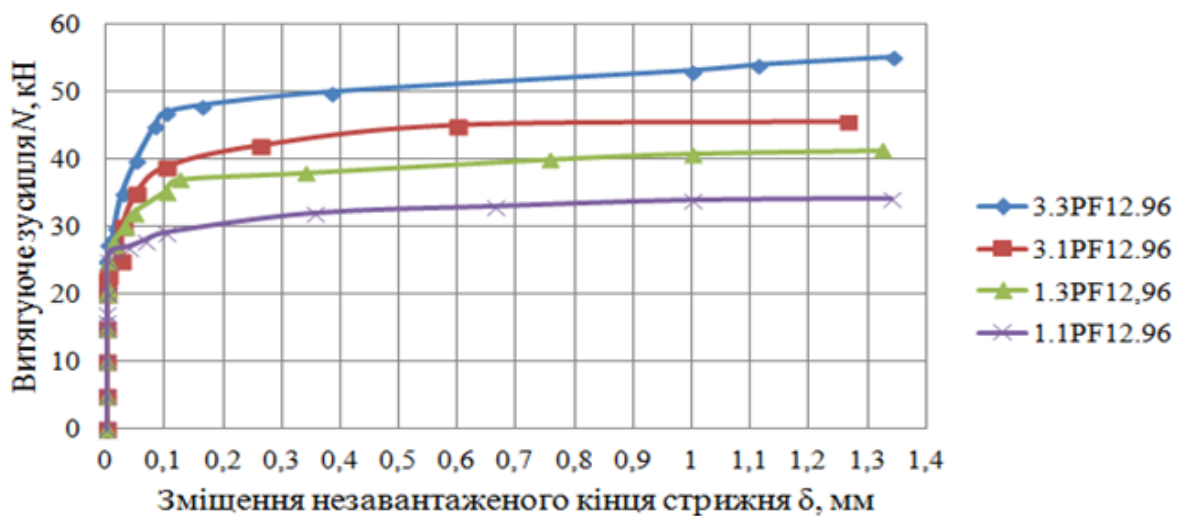


Рис. 3.3 – Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для призмових зразків 3.3PF12.96, 3.1PF12.96, 1.3PF12.96 і 1.1PF12.96

За закладання стрижнів діаметром 8 мм на довжину 96 мм (12Ø) у бетон класу С20/25 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 26,07$ МПа, армований сталеву фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,018 (зразки 1.3PF8.96), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 20,68$ кН. Зміщенню

незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 35,19$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 41,36$ кН. Під час випробування зразків 1.1PF12.96 ці зусилля дорівнювали 17,08кН, 29,11 кН і 34,17 кН відповідно.

Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 3.3PF12.96, 3.1PF12.96, 1.3PF12.96 і 1.1PF12.96 дорівнювали в середньому 1,343 мм, 1,265 мм, 1,323 мм і 1,340 мм відповідно.

За закладання стрижнів діаметром 8 мм на довжину 64 мм (8Ø) у бетон класу C30/35 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 34,75$ МПа, армований сталевую фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,018 (зразки 3.3PF8.64), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 11,88$ кН (рис. 3.4). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 20,22$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 23,76$ кН. Вказані зусилля для зразків 3.1PF8.64 з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,007 дорівнювали 9,82кН, 16,73кН і 19,52кН відповідно.

За закладання стрижнів діаметром 8 мм на довжину 64 мм (8Ø) у бетон класу C20/25 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 26,07$ МПа, армований сталевую фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,018 (зразки 1.3PF8.64), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 8,92$ кН.

Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 15,17$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 17,73$ кН. За випробування зразків 1.1PF8.64 ці зусилля дорівнювали 7,37кН, 12,55 кН і 14,60 кН відповідно.

Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 3.3PF8.64, 3.1PF8.64, 1.3PF8.64 і 1.1PF8.64 дорівнювали в середньому 1,442 мм, 1,277 мм, 1,423 мм і 1,354 мм відповідно, і за 1,8% фібрового армування за об'ємом були більшими, ніж за 0,7%.

За закладання стрижнів діаметром 10 мм на довжину 100 мм (10Ø) у бетон класу C20/25 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 26,07\text{МПа}$, армований сталеву фібру з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (зразки 1.2PF10.100), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 16,56\text{кН}$ (рис. 3.5). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 27,60\text{кН}$, а максимальне зусилля – за витягування стрижня $N_{Smax} = 32,48\text{кН}$. Вказані зусилля для зразків 1.0P10.100, які не містили фібри, дорівнювали 13,12кН, 24,00кН і 26,24 кН відповідно.

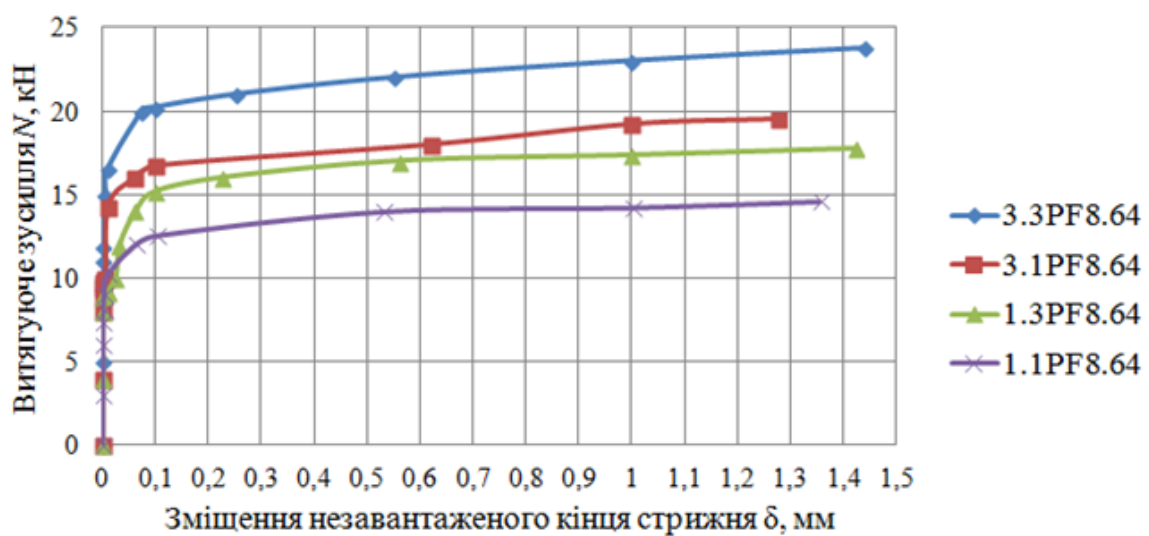


Рис. 3.4 – Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для призмових зразків 3.3PF8.64, 3.1PF8.64, 1.3PF8.64 і 1.1PF8.64

За закладання стрижнів діаметром 10 мм на довжину 100 мм (10Ø) у бетон класу C20/25 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 26,07\text{МПа}$, армований сталеву фібру з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (зразки 1.2PF10.100), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 16,56\text{кН}$ (рис. 3.5). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 27,60\text{кН}$, а максимальне зусилля – за витягування стрижня $N_{Smax} = 32,48\text{кН}$. Вказані зусилля для зразків 1.0P10.100, які не містили фібри, дорівнювали 13,12кН, 24,00кН і 26,24 кН відповідно.

Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 1.2PF10.100 і 1.0PF10.100 дорівнювали в середньому 1,336 мм та 1,117 мм відповідно.

За закладання стрижнів діаметром 10 мм на довжину 100 мм (10Ø) у бетон класу C25/30 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, армований сталеву фібру з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,007 (зразки 2.1PF10.100), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 17,93$ кН (рис. 3.5). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 30,98$ кН, а максимальне зусилля – за витягування стрижня $N_{Smax} = 35,85$ кН. Вказані зусилля для зразків 2.0P10.100, які не містили фібри, дорівнювали 15,32 кН, 25,73 кН і 30,27 кН відповідно.

Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 2.1PF10.100 і 2.0PF10.100 дорівнювали в середньому 1,224 мм та 1,151 мм відповідно.

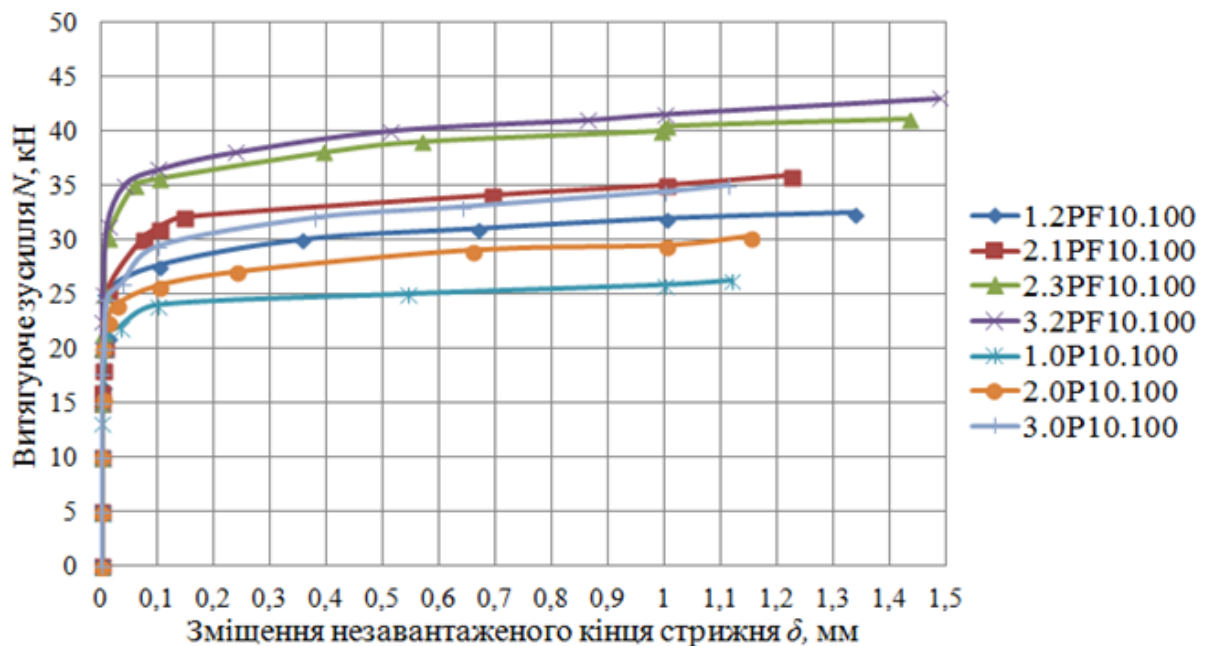


Рис. 3.5 – Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для призмових зразків 1.2PF10.100, 2.1PF10.100, 2.3PF10.100, 3.2PF10.100, 1.0P10.100, 2.0P10.100, 3.0P10.100

За закладання стрижнів діаметром 10 мм на довжину 100 мм (10Ø) у бетон класу C25/30 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, армований

сталевою фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,018 (зразки 2.3PF10.100), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 21,40$ кН (рис. 3.5). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 35,60$ кН, а максимальне зусилля – за витягування стрижня $N_{Smax} = 41,10$ кН. Вказані зусилля для зразків 2.0PF10.100, які не містили фібри, дорівнювали 15,32кН, 25,73 кН і 30,27 кН відповідно. Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 2.3PF10.100 дорівнювали в середньому 1,434 мм.

Порівнюючи результати випробувань зразків 2.1PF10.100, 2.3PF10.100 і 2.0PF10.100, можна зауважити, що за зміщення незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм зусилля $N_{S0,1}$ дорівнювали 30,98 кН, 35,60 кН і 24,00 кН відповідно. Отже, за коефіцієнта фібрового армування $\rho_{fv} = 0,007$ вказане зусилля на 29%, а за коефіцієнта фібрового армування $\rho_{fv} = 0,018$ – на на 48,3% більші порівняно зі зразками, які не містили фібри.

За закладання стрижнів діаметром 10 мм на довжину 100 мм (10Ø) у бетон класу C30/35 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 34,75$ МПа, армований сталеву фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (зразки 3.2PF10.100), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 22,43$ кН (рис. 3.5). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 36,42$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 42,99$ кН. Вказані зусилля для зразків 3.0P10.100, які не містили фібри, дорівнювали 17,72 кН, 29,33 кН і 34,97 кН відповідно. Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 3.2PF10.100 і 3.0P10.100 дорівнювали в середньому 1,486 мм і 1,111 мм відповідно.

Порівнюючи результати випробувань зразків 3.2PF10.100 і 3.0PF10.100, можна зауважити, що за зміщення незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм зусилля $N_{S0,1}$ дорівнювали 36,42 кН і 29,33 кН відповідно. Отже, за коефіцієнта фібрового армування $\rho_{fv} = 0,0125$ вказане зусилля на 24,2% більші порівняно зі зразками, які не містили фібри.

За закладання стрижнів діаметром 8 мм на довжину 80 мм (10Ø) у бетон класу C25/30 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, армований сталеву фібру з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (зразки 2.2PF8.80), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 12,13$ кН (рис. 3.6). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 20,87$ кН, а максимальне зусилля – за витягування стрижня $N_{Smax} = 22,64$ кН. Вказані зусилля для зразків 2.0P8.80, які не містили фібри, дорівнювали 9,29кН, 14,95кН і 17,59кН відповідно. Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 2.3PF8.80 і 2.0P8.80 дорівнювали в середньому 1,312 мм і 1,133мм відповідно.

Порівнюючи результати випробувань зразків 2.2PF8.80 і 2.0P8.80, можна зауважити, що за зміщення незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм зусилля $N_{S0,1}$ дорівнювали 20,87 кН і 14,97 кН відповідно. Отже, за коефіцієнта фібрового армування $\rho_{fv} = 0,0125$ вказане зусилля на 39,4% більше порівняно зі зразками, які не містили фібри.

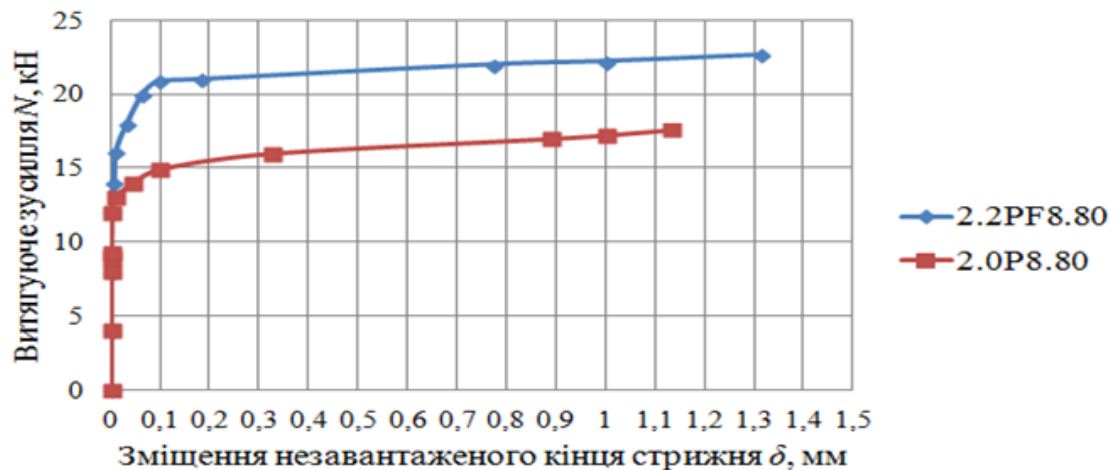


Рис. 3.6 – Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для призмових зразків 2.2PF8.80, 2.0P8.80

За закладання стрижнів діаметром 10 мм на довжину 80 мм (8Ø) у бетон класу C25/30 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, армований сталеву фібру з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (зразки 2.2PF10.80), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 15,78$ кН

(рис.3.7). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 28,94$ кН, а максимальне зусилля – за витягування стрижня $N_{Smax} = 32,20$ кН. Вказані зусилля для зразків 2.0P10.80, які не містили фібри, дорівнювали 12,24кН, 20,68кН і 24,33кН відповідно. Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 2.2PF10.80 і 2.0P10.80 дорівнювали в середньому 1,253 мм і 1,190 мм відповідно.

Порівнюючи результати випробувань зразків 2.2PF10.80 і 2.0P10.80, можна зауважити, що за зміщення незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм зусилля $N_{S0,1}$ дорівнювали 28,94кН і 20,68кН відповідно. Отже, за коефіцієнта фібрового армування $\rho_{fv} = 0,0125$ вказане зусилля на 39,9% більше порівняно зі зразками, які не містили фібри.

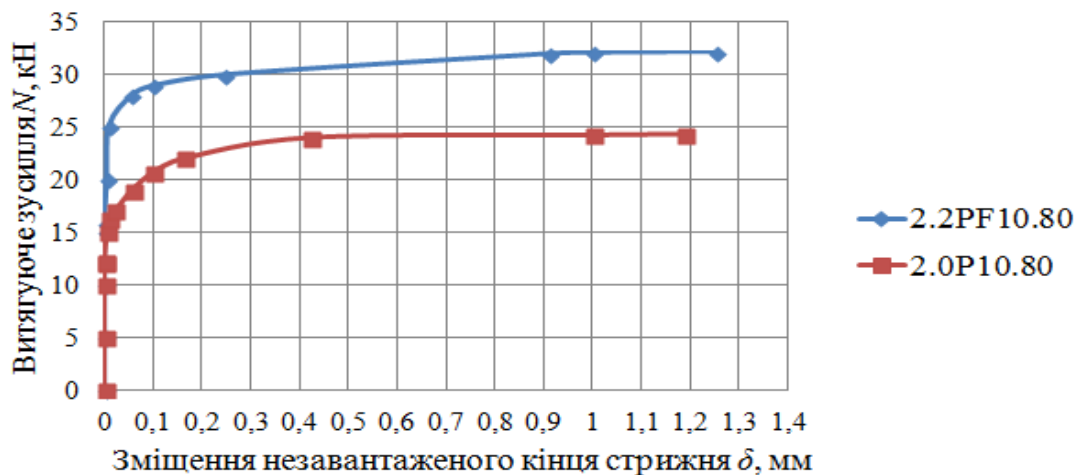


Рис. 3.7 – Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для призмових зразків 2.2PF10.80, 2.0P10.80

За закладання стрижнів діаметром 10 мм на довжину 120 мм (12Ø) у бетон класу C25/30 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, армований сталеву фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (зразки 2.2PF10.120), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 23,52$ кН (рис. 3.8). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 36,30$ кН, а максимальне зусилля – за витягування стрижня $N_{Smax} = 44,69$ кН. Вказані зусилля для зразків 2.0P10.120, які не містили фібри,

дорівнювали 18,13кН, 29,35кН і 34,53 кН відповідно. Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 2.2PF10.120 і 2.0P10.120 дорівнювали в середньому 1,243 мм і 1,144 мм відповідно.

Порівнюючи результати випробувань зразків 2.2PF10.120 і 2.0P10.120, можна зауважити, що за зміщення незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм зусилля $N_{S0,1}$ дорівнювали 36,30кН і 29,35кН відповідно. Отже, за коефіцієнта фібрового армування $\rho_{fv} = 0,0125$ вказане зусилля на 23,7% більші порівняно зі зразками, які не містили фібри.



Рис. 3.8 – Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для призматичних зразків 2.2PF10.120, 2.0P10.120

За закладання стрижнів діаметром 12 мм на довжину 120 мм (10Ø) у бетон класу С25/30 з призматичною міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, армований сталеву фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (зразки 2.2PF12.120), зміщення розпочалося за зусилля $N_{S0} = 27,28$ кН (рис. 3.9). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 46,38$ кН, а максимальне зусилля – за витягування стрижня $N_{Smax} = 54,56$ кН. Вказані зусилля для зразків 2.0P12.120, які не містили фібри, дорівнювали 21,24кН, 34,39кН і 40,45кН відповідно. Зсуви, що відповідали максимальним зусиллям, для зразків 2.2PF10.120 і 2.0P10.120 дорівнювали в середньому 1,291 мм і 1,334 мм відповідно.

Порівнюючи результати випробувань зразків 2.2PF12.120 і 2.0P12.120, можна зауважити, що за зміщення незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм зусилля $N_{S0,1}$ дорівнювали 46,38кН і 34,39кН відповідно. Отже, за коефіцієнта фібрового армування $\rho_{fv} = 0,0125$ вказане зусилля на 34,9% більше порівняно зі зразками, які не містили фібри.

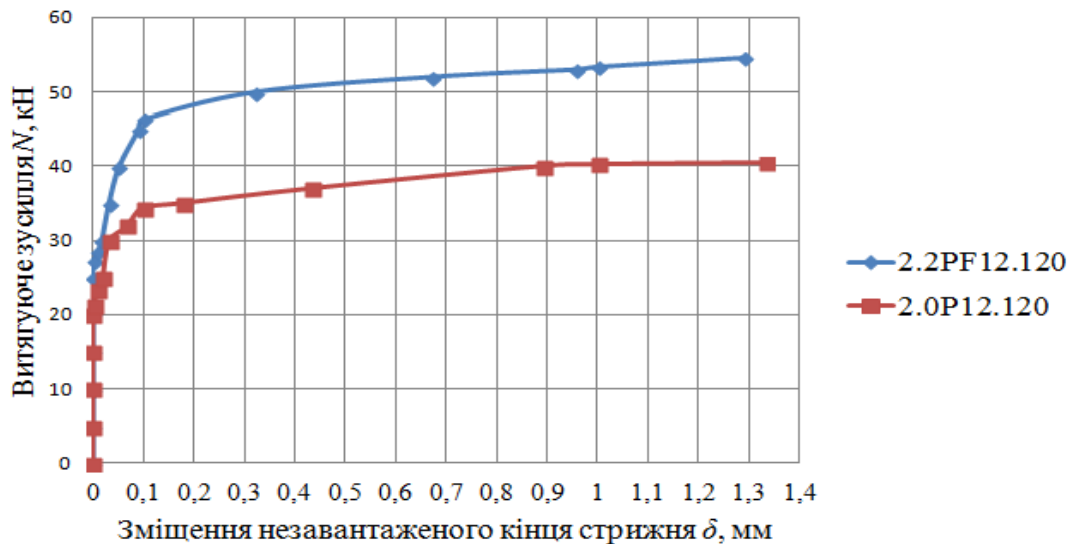


Рис. 3.9 – Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягувального зусилля для призмових зразків 2.2PF12.120, 2.0P12.120

3.2. Дослідження анкерування стрижневої арматури у сталеві фібробетони з використанням методу планування експерименту

3.2.1. Математичні моделі для визначення напружень у стрижневій арматурі та напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном на початкові зсуву

Метою цих досліджень було вивчення впливу вмісту фібри в одиниці об'єму бетону, відносної довжини закладання стрижнів у бетон, міцності бетону і діаметра стрижнів на напруження, що виникають у перерізах на завантажуваних кінцях цих стрижнів, а також на дотичні напруження в зоні

контакту стрижнів із фібробетоном на початкові зсуву та розроблення відповідних математичних моделей [42].

Програмою досліджень передбачено вивчення впливу відношень довжини анкерування стрижнів до їх діаметрів l_b/\varnothing (8 і 12), міцності бетону класів С20/25 і С30/35, коефіцієнтів фібрового армування за об'ємом (0,007 і 0,018) та діаметрів стрижнів (8 і 12 мм) на значення напружень σ_{s0} , що виникають у перерізах на завантажуваних кінцях стрижнів на початкові зсуву.

Витягували арматурні стрижні класу А500С, які були закладені по центрах основ зразків розмірами 150 x 150 x 200 мм, ступенями, не більшими за 10% від максимального очікуваного навантаження. Для визначення напружень σ_{s0} використано повний чотирифакторний експеримент.

Експериментально отримано середні значення механічних характеристик: для бетону класу С20/25 (середня кубова міцність $f_{cm,cube} = 32,71$ МПа, середня призмova міцність $f_{cm,prism} = 26,07$ МПа, середня міцність на розтяг $f_{ctm} = 2,34$ МПа, середній модуль пружності $E_{cm} = 31213$ МПа); для бетону класу С30/35 ($f_{cm,cube} = 44,33$ МПа, $f_{cm,prism} = 34,75$ МПа, $f_{ctm} = 2,83$ МПа і $E_{cm} = 34473$ МПа). Випробовували на розтяг три арматурні стрижні $\varnothing 8A500C$ (умовна межа плинності в середньому дорівнює 571 МПа, тимчасовий опір – 673 МПа), і три стрижні $\varnothing 12A500C$ (584 МПа і 689 МПа відповідно).

Умови планування повного чотирифакторного експерименту подано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Умови планування експерименту

Фактор		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	-1	0	+1	
$f_{cm,prism}$, МПа	X_1	26,07	30,41	34,75	4,34
l_b/\varnothing	X_2	8	10	12	2
ρ_{fv}	X_3	0,007	0,0125	0,018	0,0055
\varnothing , мм	X_4	8	10	12	2

Потрібно зауважити, що пробні замиси не дозволили отримати для нульового рівня варіювання значення $f_{cm,prism} = 30,41$ МПа. Для бетону класу С25/30 експериментально отримано: $f_{cm,cube} = 37,82$ МПа, $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, $f_{ctm} = 2,61$ МПа, $E_{cm} = 32565$ МПа. Таким чином, відношення призмової міцності для нульового рівня варіювання до отриманої експериментально дорівнює 1,04. Тому це зайвий раз свідчить про те, що використання ПФЕ 2⁴ є виправданим, а $f_{cm,prism}$ для нульового рівня варіювання є важкокерованим фактором.

Для ПФЕ 2⁴ рівняння регресії матиме загальний вигляд [26; 42]:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4, \quad (3.1)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ - коефіцієнти рівняння регресії; x_1, x_2, x_3, x_4 - кодовані значення факторів.

Вільний член рівняння регресії (3.1) обчислюють за формулою [26; 42]:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{y}_u}{N}, \quad (3.2)$$

де \bar{y}_u - середнє значення вихідного параметра в точці u плану для трьох зразків-близнюків;

N - кількість точок плану.

Коефіцієнти лінійних членів рівняння регресії обчислюють за формулою [42]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N \tilde{\delta}_{iu} \bar{y}_u}{N}, \quad (3.3)$$

де $\tilde{\delta}_{iu}$ - значення i -го фактора в рядку матриці в u -му досліді.

Коефіцієнти парних взаємодій визначають за формулою [42]:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N \tilde{\delta}_{iu} \tilde{\delta}_{ij} \bar{y}_u}{N}, \quad (3.4)$$

де $\tilde{\delta}_{ij}$ - значення j -го фактора в u -му досліді.

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ знаходять за формулою [42]:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)}, \quad (3.5)$$

де $\sum_{u=1}^N$ – сума за стовпцями матриці;

$\sum_{i=1}^r$ – те ж, за рядками;

r - кількість дослідів у точці плану.

Середнє квадратичне відхилення вихідного параметру знаходять за формулою [42]:

$$S_{\{(y)\}} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)}} = \sqrt{S_{\{y\}}^2}. \quad (3.6)$$

Середньоквадратичну помилку визначають за формулою [42]:

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{S_{\{y_u\}}}{\sqrt{N}}. \quad (3.7)$$

Розрахункове значення t -критерію Стьюдента (t_P) визначають за формулами [42]:

$$t_{P\{b_0\}} = \frac{|b_0|}{S_{\{b_0\}}}, \quad (3.8)$$

$$t_{P\{b_i\}} = \frac{|b_i|}{S_{\{b_i\}}}, \quad (3.9)$$

$$t_{P\{b_{ij}\}} = \frac{|b_{ij}|}{S_{\{b_{ij}\}}}. \quad (3.10)$$

Коефіцієнти можна вважати значущими, якщо розрахункове значення t_P більше за табличне t_T [42] залежно від призначеного рівня значущості і кількості степенів свободи $f_{\{y\}}$. У наших дослідях призначено рівень значимості 0,05. Кількість степенів свободи знаходять за формулою [42]:

$$f_{\{y\}} = N(r - 1). \quad (3.11)$$

Коефіцієнт t_P , якщо він незначний, тобто менший за t_T , можна відкинути, не перераховуючи інших коефіцієнтів.

Дисперсію адекватності для лінійних і неповних квадратичних рівнянь визначають за відомою формулою [42]:

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{r(\sum_{r=1}^{N_i} (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2)}{N_1 - m}, \quad (3.12)$$

де m – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні.

Таблиця 3.3 – Матриця планування і експериментальні значення нормальних напружень в арматурі при початкові зсуву σ_{S0}

Марки зразків	Точка плану	Фактори				Напруження в арматурі при початкові зсуву σ_{S0} , МПа			Середнє значення напружень в арматурі при початкові зсуву $\sigma_{S0,m}$
		x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	
3.3PF12.144	1	+1	+1	+1	+1	366,15	370,11	361,11	365,79
3.3PF8.96	2	+1	+1	+1	-1	353,55	352,18	358,73	354,82
3.1PF12.144	3	+1	+1	-1	+1	300,21	301,11	305,19	302,17
3.1PF8.96	4	+1	+1	-1	-1	290,02	295,11	294,20	293,11
3.3PF12.96	5	+1	-1	+1	+1	246,18	242,59	242,81	243,86
3.3PF8.64	6	+1	-1	+1	-1	238,19	235,8	235,63	236,54
3.1PF12.96	7	+1	-1	-1	+1	197,06	207,54	199,75	201,45
3.1PF8.64	8	+1	-1	-1	-1	195,32	189,98	200,93	195,41
1.3PF12.144	9	-1	+1	+1	+1	276,25	275,34	271,67	274,42
1.3PF8.96	10	-1	+1	+1	-1	268,77	262,93	266,87	266,19
1.1PF12.144	11	-1	+1	-1	+1	223,45	227,04	229,58	226,69
1.1PF8.96	12	-1	+1	-1	-1	216,56	221,90	221,21	219,89
1.3PF12.96	13	-1	-1	+1	+1	179,56	183,34	185,92	182,94
1.3PF8.64	14	-1	-1	+1	-1	181,12	175,57	175,66	177,45
1.1PF12.96	15	-1	-1	-1	+1	155,91	150,23	147,25	151,13
1.1PF8.64	16	-1	-1	-1	-1	149,44	145,14	145,22	146,60
Сума									3838,46
									$b_0 = 239,90$
Результати подано як середні для трьох зразків-близнюків									

Адекватність моделі перевіряють за критерієм Фішера (F -критерієм).

Якщо $S_{\hat{a}\hat{a}}^2 > S_{\{y\}}^2$, то:

$$F_p = \frac{S_{\hat{a}\hat{a}}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (3.13)$$

а якщо $S_{\hat{a}\hat{a}}^2 < S_{\{y\}}^2$, то:

$$F_p = \frac{S_{\{y\}}^2}{S_{\hat{a}\hat{a}}^2}, \quad (3.14)$$

де $S_{\{y\}}^2$ - дисперсія відтворюваності вихідного параметра.

Табличне значення критерію Фішера F_T залежить від довірчої імовірності, яку доцільно приймати такою, що дорівнює 95%, і кількості степенів свободи дисперсії адекватності $f_{ад}$, яку визначають для лінійних і неповних квадратичних рівнянь за формулою:

$$f_{ад} = N - m. \quad (3.15)$$

Рівняння вважають адекватним, якщо для прийнятого рівня довірчої імовірності виконується умова, що $F_p < F_T$.

Вільний член рівняння регресії визначали за формулою (3.2) і даними таблиці 3.3:

$$b_0 = \frac{\sum_1^N \bar{y}_u}{N} = \frac{3838,46}{16} = 239,9.$$

Далі визначали розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів рівняння регресії за лінійних членів і за взаємодій (таблиця 3.4).

Коефіцієнти рівняння регресії $b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ визначали за формулами (3.3) та (3.4) і даними таблиці 3.4:

$$b_1 = \frac{547,84}{16} = 34,24;$$

$$b_2 = \frac{767,7}{16} = 47,98;$$

$$b_3 = \frac{365,56}{16} = 22,85;$$

$$b_4 = \frac{58,44}{16} = 3,65;$$

$$b_{12} = \frac{109,56}{16} = 6,85;$$

$$b_{13} = \frac{52,18}{16} = 3,26;$$

$$b_{14} = \frac{8,34}{16} = 0,52;$$

$$b_{23} = \frac{73,16}{16} = 4,57;$$

$$b_{24} = \frac{11,68}{16} = 0,73;$$

$$b_{34} = \frac{5,58}{16} = 0,35.$$

Таблиця 3.4 – Коефіцієнти рівняння регресії функції σ_{S_0}

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів									
за лінійних членів				за взаємодій					
$\bar{y}\bar{\delta}_1$	$\bar{y}\bar{\delta}_2$	$\bar{y}\bar{\delta}_3$	$\bar{y}\bar{\delta}_4$	$\bar{y}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_2$	$\bar{y}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_3$	$\bar{y}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_4$	$\bar{y}\bar{\delta}_2\bar{\delta}_3$	$\bar{y}\bar{\delta}_2\bar{\delta}_4$	$\bar{y}\bar{\delta}_3\bar{\delta}_4$
+365,79	+365,79	+365,79	+365,79	+365,79	+365,79	+365,79	+365,79	+365,79	+365,79
+354,82	+354,82	+354,82	-354,82	+354,82	+354,82	-354,82	+354,82	-354,82	-354,82
+302,17	+302,17	-302,17	+302,17	+302,17	-302,17	+302,17	-302,17	+302,17	-302,17
+293,11	+293,11	-293,11	-293,11	+293,11	-293,11	-293,11	-293,11	-293,11	+293,11
+243,86	-243,86	+243,86	+243,86	-243,86	+243,86	+243,86	-243,86	-243,86	+243,86
+236,54	-236,54	+236,54	-236,54	-236,54	+236,54	-236,54	-236,54	+236,54	-236,54
+201,45	-201,45	-201,45	+201,45	-201,45	-201,45	+201,45	+201,45	-201,45	-201,45
+195,41	-195,41	-195,41	-195,41	-195,41	-195,41	-195,41	+195,41	+195,41	+195,41
-274,42	+274,42	+274,42	+274,42	-274,42	-274,42	-274,42	+274,42	+274,42	+274,42
-266,19	+266,19	+266,19	-266,19	-266,19	-266,19	+266,19	+266,19	-266,19	-266,19
-226,69	+226,69	-226,69	+226,69	-226,69	+226,69	-226,69	-226,69	+226,69	-226,69
-219,89	+219,89	-219,89	-219,89	-219,89	+219,89	+219,89	-219,89	-219,89	+219,89
-182,94	-182,94	+182,94	+182,94	+182,94	-182,94	-182,94	-182,94	-182,94	+182,94
-177,45	-177,45	+177,45	-177,45	+177,45	-177,45	+177,45	-177,45	+177,45	-177,45
-151,13	-151,13	-151,13	+151,13	+151,13	+151,13	-151,13	+151,13	-151,13	-151,13
-146,60	-146,60	-146,60	-146,60	+146,60	+146,60	+146,60	+146,60	+146,60	+146,60
$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$
547,84	+767,7	+365,56	+58,44	+109,56	+52,18	+8,34	+73,16	+11,68	+5,58
$b_1=$	$b_2=$	$b_3=$	$b_4=$	$b_{12}=$	$b_{13}=$	$b_{14}=$	$b_{23}=$	$b_{24}=$	$b_{34}=$
34,24	47,98	22,85	3,65	6,85	3,26	0,52	4,57	0,73	0,35

Для визначення значущості цих коефіцієнтів визначаємо спочатку дисперсію відтворюваності за рядками матриці (таблиця 3.5).

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ знаходили за формулою (3.5):

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)} = \frac{381,6308}{16(3-1)} = 11,93.$$

Середньоквадратичне відхилення визначаємо за формулою (3.6):

$$S_{\{y\}} = \sqrt{S_{\{y\}}^2} = \sqrt{11,93} = 3,45.$$

Середньоквадратична помилка (формула (3.7)):

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{S_{\{y_u\}} \cdot 3,45}{\sqrt{N} \cdot \sqrt{16}} = 0,863.$$

Табличне значення t -критерію Стьюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$ ($P = 95\%$) дорівнює 2,04 [42], що відповідає кількості ступенів свободи $f_y = N(r - 1) = 16(3 - 1) = 32$.

З таблиці 3.4 вибираємо найменші значення коефіцієнтів рівняння регресії і знаходимо розрахункове значення t_p за формулою (3.10):

$$t_p = \frac{|b_{34}|}{S_{\{b_{34}\}}} = \frac{0,35}{0,863} = 0,41 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{14}|}{S_{\{13\}}} = \frac{0,52}{0,863} = 0,60 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{24}|}{S_{\{24\}}} = \frac{0,73}{0,863} = 0,84 < t = 2,04.$$

Отже, ці коефіцієнти є незначущими, і рівняння регресії у кодованому виді набуває вигляду:

$$\hat{y} = 239,9 + 34,24x_1 + 47,98x_2 + 22,85x_3 + 3,65x_4 + 6,85x_1x_2 + 3,26x_1x_3 + 4,57x_2x_3. \quad (3.16)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення u для кожного рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (таблиця 3.6).

Дисперсію адекватності визначаємо за формулою (3.12):

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{r(\sum_{i=1}^N (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2)}{N_1 - m} = \frac{3 \cdot 21,8958}{16 - 8} = 8,21,$$

де m – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні.

Оскільки $S_{\ddot{a}\ddot{a}}^2 < S_{\{y\}}^2$, то розрахункове значення критерію Фішера визначаємо за формулою (3.14):

$$F_p = \frac{S_{\ddot{a}\ddot{a}}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{11,93}{8,21} = 1,45.$$

Табличне значення критерію Фішера F_T , якщо $f_1 = 16(3 - 1) = 32$ і $f_2 = 16 - 8 = 8$, за інтерполяцією дорівнює 3,11. Отже, $F_p = 1,45 < F_T = 3,11$, тому рівняння регресії є адекватним.

Натуральні X_i кодовані значення x_i є взаємопов'язаними:

$$\tilde{o}_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3.17)$$

де X_{i0} – значення нульової точки;

ΔX_{i0} – інтервал варіювання.

Таким чином, отримуємо:

$$x_1 = \frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34}; x_2 = \frac{l_b / \phi - 10}{2}; x_3 = \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055}; x_4 = \frac{\phi - 10}{2}.$$

Таблиця 3.5 – Розрахунок дисперсії відтворюваності для функції σ_{50} за рядками матриці

Точки плану и	$(y_1 - \bar{y}_m)^2$	$(y_2 - \bar{y}_m)^2$	$(y_3 - \bar{y}_m)^2$	$\sum S_{\{y\}}^2$
1	0,1296	18,6624	21,9024	40,6944
2	1,6129	6,9696	15,2881	23,8706
3	3,8416	1,1236	9,1204	14,0856
4	9,5481	4,000	1,1881	14,7362
5	5,3824	1,6129	1,1025	8,0978
6	2,7225	0,5476	0,8281	4,0982
7	19,2721	37,0881	2,8900	59,2502
8	0,0081	29,4849	30,470	59,9634
9	3,3489	0,8464	7,5625	11,7578
10	6,6564	10,6276	0,4624	17,7464
11	10,4976	0,1225	8,3521	18,9722
12	11,0889	4,0401	1,7424	16,8714
13	11,4244	0,16	8,8804	20,4648
14	13,4689	3,5344	3,2041	20,2074
15	22,8484	0,81	15,054	38,7128
16	8,0656	2,1316	1,9044	12,1016
Сума				381,6308

Рівняння регресії для визначення напружень у стрижневій арматурі на початкові зсуву σ_{S0} у натуральному вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_{S0} = & 239,9 + 34,24 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 47,98 \frac{l_b/\phi-10}{2} + 22,85 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + \\ & 3,65 \frac{\phi-10}{2} + 6,85 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_b/\phi-10}{2} \right) + 3,26 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) + \\ & 4,57 \left(\frac{l_b/\phi-10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right). \end{aligned} \quad (3.18)$$

Статистичний аналіз відношень теоретичних значень σ_{S0} до середніх експериментальних засвідчив, що середньоквадратичне відхилення $S=0,00557$, а коефіцієнт варіації $v = 0,56\%$ (таблиця 3.7).

Умови планування експерименту для отримання математичної моделі напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном на початку зсуву прийнято такими ж, як і за вивчення напружень у завантажуваних кінцях стрижнів на початкові зсуву (таблиця 3.2). Середні дотичні напруження зчеплення стрижнів з фібробетоном на початкові зсуву τ_{b0} знаходили з умови рівності зовнішнього витягувального зусилля і зусилля зчеплення:

$$N_{S0} = \pi \phi l_b \tau_{b0}. \quad (3.19)$$

Матрицю планування експерименту подано в таблиці 3.8.

Вільний член рівняння регресії визначали за формулою (3.2) і даними таблиці 3.8:

$$b_0 = \frac{\sum_1^N \bar{y}_u}{N} = \frac{95,97}{16} = 5,998 \approx 6.$$

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів рівняння регресії за лінійних членів і за взаємодій подано в таблиці 3.9.

Коефіцієнти рівняння регресії $b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ визначали за формулами (3.3) та (3.4) і даними таблиці 3.9:

$$b_1 = \frac{13,69}{16} = 0,86;$$

$$b_2 = \frac{-0,01}{16} = -0,0006;$$

$$b_3 = \frac{9,15}{16} = 0,57;$$

$$b_4 = \frac{1,45}{16} = 0,09;$$

$$b_{12} = \frac{-0,01}{16} = -0,0006;$$

$$b_{13} = \frac{1,27}{16} = 0,08;$$

$$b_{14} = \frac{0,21}{16} = 0,01;$$

$$b_{23} = \frac{0,01}{16} = 0,0006;$$

$$b_{24} = \frac{-0,01}{16} = -0,0006;$$

$$b_{34} = \frac{0,15}{16} = 0,009.$$

Для визначення значущості цих коефіцієнтів визначаємо спочатку дисперсію відтворюваності за рядками матриці (таблиця 3.10).

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ знаходили за формулою (3.5):

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)} = \frac{0,2862}{16(3-1)} = 0,00894,$$

де $\sum_{u=1}^N$ – сума за стовпцями матриці, $\sum_{i=1}^r$ – те ж, за рядками, N – загальна кількість точок плану.

Середньоквадратичне відхилення визначали за формулою (3.6):

$$S_{\{(y)\}} = \sqrt{S_{\{(y)\}}^2} = \sqrt{0,00894} = 0,0946.$$

Середньоквадратичну помилку визначали за формулою (3.7):

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{S_{\{y_u\}}}{\sqrt{N}} = \frac{0,0946}{\sqrt{16}} = 0,0237.$$

Табличне значення t -критерію Стюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$ ($P = 95\%$) дорівнює 2,04, що відповідає числу ступенів свободи $f_y =$

$N(r - 1) = 16(3 - 1) = 32$. З таблиці 3.9 вибираємо значення коефіцієнтів і знаходимо розрахункове значення t_p за формулою:

$$t_p = \frac{|b_2|}{S_{\{b_2\}}} = \frac{|b_{12}|}{S_{\{b_{12}\}}} = \frac{|b_{23}|}{S_{\{b_{23}\}}} = \frac{|b_{24}|}{S_{\{b_{24}\}}} = \frac{0,0006}{0,0237} = 0,025 < t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_{34}|}{S_{\{b_{34}\}}} = \frac{0,009}{0,0237} = 0,38 < t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_{14}|}{S_{\{b_{14}\}}} = \frac{0,01}{0,0237} = 0,42 < t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_{13}|}{S_{\{b_{13}\}}} = \frac{0,08}{0,0237} = 3,37 > t = 2,04.$$

Отже, коефіцієнти $b_2, b_{12}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ є незначущими, і рівняння регресії у кодованому виді набуває вигляду:

$$\hat{y} = 6 + 0,86x_1 + 0,57x_3 + 0,09x_4 + 0,08x_1x_3 \quad (3.20)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення u для кожного рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (таблиця 3.11).

Розрахункове значення критерію Фішера $F_p = 0,14$. Табличне значення критерію Фішера F_T при $f_1 = 16(3 - 1) = 32$ і $f_2 = 16 - 5 = 11$ за інтерполяцією дорівнює 2,65. Отже, $F_p < F_T$, тому рівняння регресії є адекватним. Таким чином, отримуємо рівняння для визначення дотичних напружень за витягування стрижнів із фібробетонних призм на початку зсуву:

$$\tau_{b0} = 6 + 0,86 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 0,57 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 0,09 \frac{\phi^{-10}}{2} + 0,08 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right). \quad (3.21)$$

Статистичний аналіз відношень теоретичних значень τ_{b0} до середніх експериментальних засвідчив, що середньоквадратичне відхилення $S = 0,00299$, а коефіцієнт варіації $v = 0,3\%$ (таблиця 3.12).

Аналіз результатів експериментальних досліджень напружень у стрижневій арматурі та напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном на початку зсуву засвідчив, що найбільші за значеннями σ_{S0} і

Таблиця 3.6 – Розрахунок дисперсії адекватності для функції σ_{50}

Точки плану	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	\hat{y}_u	\bar{y}_u	$\hat{y}_u - \bar{y}_u$	$(\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2$
1	239,90	+34,24	+47,98	+22,85	+3,65	+6,85	+3,26	0	+4,57	0	0	363,30	365,79	-2,49	6,2001
2	239,90	+34,24	+47,98	+22,85	-3,65	+6,85	+3,26	0	+4,57	0	0	356,00	354,82	1,18	1,3924
3	239,90	+34,24	+47,98	-22,85	+3,65	+6,85	-3,26	0	-4,57	0	0	301,94	302,17	-0,23	0,0529
4	239,90	+34,24	+47,98	-22,85	-3,65	+6,85	-3,26	0	-4,57	0	0	294,64	293,11	1,53	2,3409
5	239,90	+34,24	-47,98	+22,85	+3,65	-6,85	+3,26	0	-4,57	0	0	244,50	243,86	0,64	0,4096
6	239,90	+34,24	-47,98	+22,85	-3,65	-6,85	+3,26	0	-4,57	0	0	237,20	236,54	0,66	0,4356
7	239,90	+34,24	-47,98	-22,85	+3,65	-6,85	-3,26	0	+4,57	0	0	201,42	201,45	-0,03	0,0009
8	239,90	+34,24	-47,98	-22,85	-3,65	-6,85	-3,26	0	+4,57	0	0	194,12	195,41	-1,29	1,6641
9	239,90	-34,24	+47,98	+22,85	+3,65	-6,85	-3,26	0	+4,57	0	0	274,60	274,42	0,18	0,0324
10	239,90	-34,24	+47,98	+22,85	-3,65	-6,85	-3,26	0	+4,57	0	0	267,30	266,19	1,11	1,2321
11	239,90	-34,24	+47,98	-22,85	+3,65	-6,85	+3,26	0	-4,57	0	0	226,28	226,69	-0,41	0,1681
12	239,90	-34,24	+47,98	-22,85	-3,65	-6,85	+3,26	0	-4,57	0	0	218,98	219,89	-0,91	0,8281
13	239,90	-34,24	-47,98	+22,85	+3,65	+6,85	-3,26	0	-4,57	0	0	183,20	182,94	0,26	0,0676
14	239,90	-34,24	-47,98	+22,85	-3,65	+6,85	-3,26	0	-4,57	0	0	175,90	177,45	-1,55	2,4025
15	239,90	-34,24	-47,98	-22,85	+3,65	+6,85	+3,26	0	+4,57	0	0	153,16	151,13	2,03	4,1209
16	239,90	-34,24	-47,98	-22,85	-3,65	+6,85	+3,26	0	+4,57	0	0	145,86	146,60	-0,74	0,5476
Сума															21,8958

Таблиця 3.7 – До визначення коефіцієнта варіації у відношення теоретичних значень $\sigma_{S0,theor}$ до середніх експериментальних

Марки зразків	$\sigma_{S0,theor}$	$\sigma_{S0,exp}$	$\frac{\sigma_{S0,theor}}{\sigma_{S0,exp}}$	$\sigma_{S0,exp}$		S	v	
				$\left(\frac{\sigma_{S0,theor}}{\sigma_{S0,exp}}\right)_m$	Δ			Δ^2
3.3PF12.144	363,3	365,79	0,993193	0,999974	-0,00678	4,59904E-05	0,0055733	0,005573443
3.3PF8.96	356	354,82	1,003326		0,003351	1,12305E-05		
3.1PF12.144	301,94	302,17	0,999239		-0,00074	5,41106E-07		
3.1PF8.96	294,64	293,11	1,00522		0,005245	2,75147E-05		
3.3PF12.96	244,5	243,86	1,002624		0,00265	7,0226E-06		
3.3PF8.64	237,2	236,54	1,00279		0,002816	7,92866E-06		
3.1PF12.96	201,42	201,45	0,999851		-0,00012	1,52173E-08		
3.1PF8.64	194,12	195,41	0,993398		-0,00658	4,3243E-05		
1.3PF12.144	274,6	274,42	1,000656		0,000681	4,6443E-07		
1.3PF8.96	267,3	266,19	1,00417		0,004196	1,76024E-05		
1.1PF12.144	226,28	226,69	0,998191		-0,00178	3,17936E-06		
1.1PF8.96	218,98	219,89	0,995862		-0,00411	1,69157E-05		
1.3PF12.96	183,2	182,94	1,001421		0,001447	2,09321E-06		
1.3PF8.64	175,9	177,45	0,991265		-0,00871	7,58518E-05		
1.1PF12.96	153,16	151,13	1,013432		0,013458	0,00018111		
1.1PF8.64	145,86	146,6	0,994952		-0,00502	2,52224E-05		

$$\Delta_i = \left(\frac{\sigma_{S0,theor}}{\sigma_{S0,exp}}\right)_i - \left(\frac{\sigma_{S0,theor}}{\sigma_{S0,exp}}\right)_m; S = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}}; n=16; v = S / \left(\frac{\sigma_{S0,theor}}{\sigma_{S0,exp}}\right)_m$$

τ_{b0} отримано в зразках 3.3PF12.144 і 3.3PF8.96. За випробування зразків 3.3PF12.144 отримано: $\sigma_{S0} = 365,79$ МПа і $\tau_{b0} = 7,60$ МПа, а за випробування зразків 3.3PF8.96: $\sigma_{S0} = 354,82$ МПа і $\tau_{b0} = 7,42$ МПа. Відношення напружень σ_{S0} вказаних зразків дорівнює 1,03, а відношення τ_{S0} - 1,02. За відносної довжини закладання $\frac{l_b}{\phi} = 12$ стрижнів діаметром 12 мм і 8 мм у фібробетон з матрицею класу C30/35 і відсотком армування фіброю по об'єму 1,8 напруження σ_{S0} і τ_{b0} мають відповідно дуже близькі значення.

Таблиця 3.8 – Матриця планування і експериментальні значення напружень зчеплення стрижнів з фібробетоном при початку зсуву τ_{b0}

Марки зразків	Точка плану	Фактори				Напруження зчеплення стрижнів із фібробетоном при початковій зсуву τ_{b0} , МПа			Середні значення напружень зчеплення стрижнів з фібробетоном при початковій зсуву $\tau_{b0,m}$
		x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	
3.3PF12.144	1	+1	+1	+1	+1	7,63	7,71	7,52	7,62
3.3PF8.96	2	+1	+1	+1	-1	7,37	7,34	7,47	7,39
3.1PF12.144	3	+1	+1	-1	+1	6,25	6,27	6,36	6,29
3.1PF8.96	4	+1	+1	-1	-1	6,04	6,15	6,13	6,11
3.3PF12.96	5	+1	-1	+1	+1	7,69	7,58	7,59	7,62
3.3PF8.64	6	+1	-1	+1	-1	7,44	7,37	7,36	7,39
3.1PF12.96	7	+1	-1	-1	+1	6,16	6,49	6,24	6,30
3.1PF8.64	8	+1	-1	-1	-1	6,10	5,94	6,28	6,11
1.3PF12.144	9	-1	+1	+1	+1	5,76	5,74	5,66	5,72
1.3PF8.96	10	-1	+1	+1	-1	5,60	5,48	5,56	5,55
1.1PF12.144	11	-1	+1	-1	+1	4,66	4,73	4,78	4,72
1.1PF8.96	12	-1	+1	-1	-1	4,51	4,62	4,61	4,58
1.3PF12.96	13	-1	-1	+1	+1	5,61	5,73	5,81	5,72
1.3PF8.64	14	-1	-1	+1	-1	5,66	5,49	5,49	5,55
1.1PF12.96	15	-1	-1	-1	+1	4,87	4,69	4,60	4,72
1.1PF8.64	16	-1	-1	-1	-1	4,67	4,54	4,54	4,58
Марки зразків	Сума								95,97
									$b_0 = 5,998 \approx 6$
Результати подано як середні для трьох зразків-близнюків									

Найменші напруження за значеннями σ_{s0} і τ_{b0} отримано в зразках 1.1PF12.96 і 1.1PF8.64. У зразках 1.1PF12.96 напруження σ_{s0} і τ_{bs0} дорівнювали 151,13 МПа і 4,74 МПа, а в зразках 1.1PF8.64 – 146,60 МПа і 4,56 МПа відповідно. Тут відношення напружень σ_{s0} вказаних зразків дорівнює 1,03, а відношення τ_{b0} – 1,04. Тобто, як і в попередньо розглянутих зразках за відносної довжини закладання $\frac{l_b}{\phi} = 8$ стрижнів діаметром 12 мм і 8 мм у фібробетоні з матрицею класу C20/25 і відсотком армування фіброю за об'ємом 0,7 напруження σ_{s0} і τ_{b0} мають близькі значення.

Таблиця 3.9 – Коефіцієнти рівняння регресії функції τ_{b0}

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів									
за лінійних членів				за взаємодій					
$\bar{y}\bar{d}_1$	$\bar{y}\bar{d}_2$	$\bar{y}\bar{d}_3$	$\bar{y}\bar{d}_4$	$\bar{y}\bar{d}_1\bar{d}_2$	$\bar{y}\bar{d}_1\bar{d}_3$	$\bar{y}\bar{d}_1\bar{d}_4$	$\bar{y}\bar{d}_2\bar{d}_3$	$\bar{y}\bar{d}_2\bar{d}_4$	$\bar{y}\bar{d}_3\bar{d}_4$
+7,62	+7,62	+7,62	+7,62	+7,62	+7,62	+7,62	+7,62	+7,62	+7,62
+7,39	+7,39	+7,39	-7,39	+7,39	+7,39	-7,39	+7,39	-7,39	-7,39
+6,29	+6,29	-6,29	+6,29	+6,29	-6,29	+6,29	-6,29	+6,29	-6,29
+6,11	+6,11	-6,11	-6,11	+6,11	-6,11	-6,11	-6,11	-6,11	+6,11
+7,62	-7,62	+7,62	+7,62	-7,62	+7,62	+7,62	-7,62	-7,62	+7,62
+7,39	-7,39	+7,39	-7,39	-7,39	+7,39	-7,39	-7,39	+7,39	-7,39
+6,30	-6,30	-6,30	+6,30	-6,30	-6,30	+6,30	+6,30	-6,30	-6,30
+6,11	-6,11	-6,11	-6,11	-6,11	-6,11	-6,11	+6,11	+6,11	+6,11
-5,72	+5,72	+5,72	+5,72	-5,72	-5,72	-5,72	+5,72	+5,72	+5,72
-5,55	+5,55	+5,55	-5,55	-5,55	-5,55	+5,55	+5,55	-5,55	-5,55
-4,72	+4,72	-4,72	+4,72	-4,72	+4,72	-4,72	-4,72	+4,72	-4,72
-4,58	+4,58	-4,58	-4,58	-4,58	+4,58	+4,58	-4,58	-4,58	+4,58
-5,72	-5,72	+5,72	+5,72	+5,72	-5,72	-5,72	-5,72	-5,72	+5,72
-5,55	-5,55	+5,55	-5,55	+5,55	-5,55	+5,55	-5,55	+5,55	-5,55
-4,72	-4,72	-4,72	+4,72	+4,72	+4,72	-4,72	+4,72	-4,72	-4,72
-4,58	-4,58	-4,58	-4,58	+4,58	+4,58	+4,58	+4,58	+4,58	+4,58
$\Sigma =$ +13,69	$\Sigma =$ -0,01	$\Sigma =$ +9,15	$\Sigma =$ +1,45	$\Sigma =$ -0,01	$\Sigma =$ +1,27	$\Sigma =$ +0,21	$\Sigma =$ +0,01	$\Sigma =$ -0,01	$\Sigma =$ +0,15
$b_1 =$ +0,86	$b_2 =$ -0,0006	$b_3 =$ +0,57	$b_4 =$ +0,09	$b_{12} =$ -0,0006	$b_{13} =$ +0,08	$b_{14} =$ +0,01	$b_{23} =$ +0,0006	$b_{24} =$ -0,0006	$b_{34} =$ +0,009

Аналіз рівняння регресії (3.18) і даних таблиці 3.6 свідчить про те, що на напруження у стрижні за початку зсуву незавантаженого кінця σ_{s0} впливають

усі фактори. На нульовому рівні варіювання $\sigma_{S0} = 239,9$ МПа, а на верхньому рівні $\sigma_{S0} = 363,3$ МПа, тобто приріст напружень дорівнює 51,4%. Найбільше на приріст напружень впливає збільшення відносної довжини закладання стрижня l_b/ϕ . Збільшення l_b/ϕ з 10 до 12 дає приріст напружень σ_{S0} , що дорівнює 47,98 МПа.

Таблиця 3.10 – Розрахунок дисперсії відтворюваності функції τ_{b0} за рядками матриці

Точки плану	$(y_1 - \bar{y}_n)^2$	$(y_2 - \bar{y}_n)^2$	$(y_3 - \bar{y}_n)^2$	$\sum S_{\{y\}}^2$
1	1E-04	0,0081	0,01	0,0182
2	0,0004	0,0025	0,0064	0,0093
3	0,0016	0,0004	0,0049	0,0069
4	0,0049	0,0016	0,0004	0,0069
5	0,0049	0,0016	0,0009	0,0074
6	0,0025	0,0004	0,0009	0,0038
7	0,0196	0,0361	0,0036	0,0593
8	0,0001	0,0289	0,0289	0,0579
9	0,0016	0,0004	0,0036	0,0056
10	0,0025	0,0049	1E-04	0,0075
11	0,0036	0,0001	0,0036	0,0073
12	0,0049	0,0016	0,0009	0,0074
13	0,0121	0,0001	0,0081	0,0203
14	0,0121	0,0036	0,0036	0,0193
15	0,0225	0,0009	0,0144	0,0378
16	0,0081	0,0016	0,0016	0,0113
Сума				0,2862

Підвищення призмової міцності бетону $f_{cm,prism}$ з 30,41 МПа до 34,75 МПа зумовлює приріст напружень σ_{S0} , що дорівнює 34,24 МПа. Підвищення коефіцієнта фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} з 0,0125 до 0,018 призводить до збільшення σ_{S0} на 22,85 МПа. Збільшення діаметра стрижнів ϕ з 10 мм до 12 мм забезпечило приріст напружень 3,65 МПа, що свідчить про несуттєву різницю індексів $\text{Re}ma f_i$ (0,0565 і 0,0572 для стрижнів діаметром 8 мм і 12 мм

відповідно). Взаємодії факторів $f_{cm,prism}$ і l_b/Φ , $f_{cm,prism}$ і ρ_{fv} , l_b/Φ і ρ_{fv} збільшили напруження σ_{S0} сумарно на 14,68 МПа порівняно з нульовим рівнем варіювання.

Аналіз рівняння регресії (3.21) і даних таблиці 3.10 свідчить про те, що на дотичні напруження на початкові зсуву незавантаженого кінця τ_{b0} впливають усі фактори, крім відносної довжини закладання стрижня у фібробетон l_b/Φ .

На нульовому рівні варіювання $\tau_{b0} = 6$ МПа, а на верхньому рівні $\tau_{b0} = 7,6$ МПа, тобто приріст дотичних напружень дорівнює 26,7%. Найбільше на приріст дотичних напружень впливає збільшення призмової міцності бетону $f_{cm,prism}$. Її підвищення з 30,41 МПа до 34,75 МПа зумовлює приріст напружень τ_{b0} , що дорівнює 0,86 МПа.

Підвищення коефіцієнта фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} з 0,0125 до 0,018 призводить до збільшення τ_{b0} на 0,57 МПа. Збільшення діаметра стрижнів Φ з 10 мм до 12 мм забезпечило приріст дотичних напружень 0,09 МПа, що свідчить про несуттєву різницю індексів Рема f_r (0,0565 і 0,0572 для стрижнів діаметром 8 мм і 12 мм відповідно). Взаємодія факторів $f_{cm,prism}$ і ρ_{fv} збільшила напруження τ_{b0} на 0,08 МПа порівняно з нульовим рівнем варіювання.

На рис. 3.10 – 3.12 показано, якою має бути відносна довжина закладання стрижнів діаметром 8, 10 і 12 мм у фібробетон, щоб за характеристичного значення міцності арматури 500 МПа не відбулося зсуву незавантажених кінців стрижнів за різних коефіцієнтів фібрового армування. Дані отримано з рівняння регресії (3.18).

Виявляється, що вказані відносні довжини закладання стрижнів у фібробетон майже не залежать від діаметра стрижнів, а лише від міцності бетону $f_{cm,prism}$ і коефіцієнта фібрового армування ρ_{fv} . Наприклад, за $f_{cm,prism} = 34,75$ МПа і $\rho_{fv} = 0,018$ МПа $\frac{l_b}{\Phi} = 16,85; 16,73; 16,60$ для стрижнів діаметром 8, 10, 12 мм відповідно.

Відомо, що за критерій втрати зчеплення стрижня прийнято зсув його незавантаженого кінця на 0,1 мм. Однак, наприклад, для конструкцій, що сприймають багаторазово повторні навантаження, вказаний критерій може бути іншим – відсутність такого зсуву. У цьому разі формули (3.18) і (3.21) можна використати для знаходження напружень σ_{S0} і τ_{b0} відповідно.

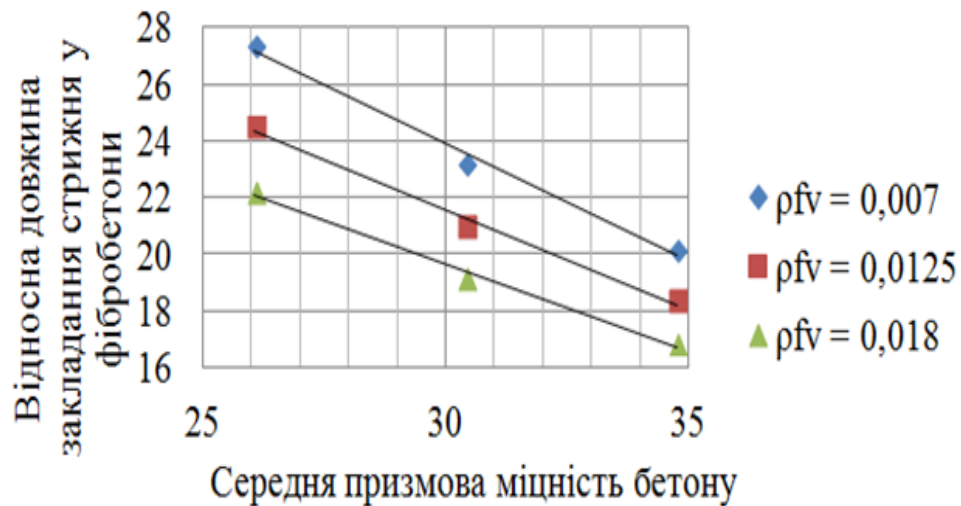


Рис. 3.10 – Залежність « $\frac{l_b}{\phi} - f_{cm,prism}$ » при $\sigma_S = 500$ МПа на початку зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 8 мм

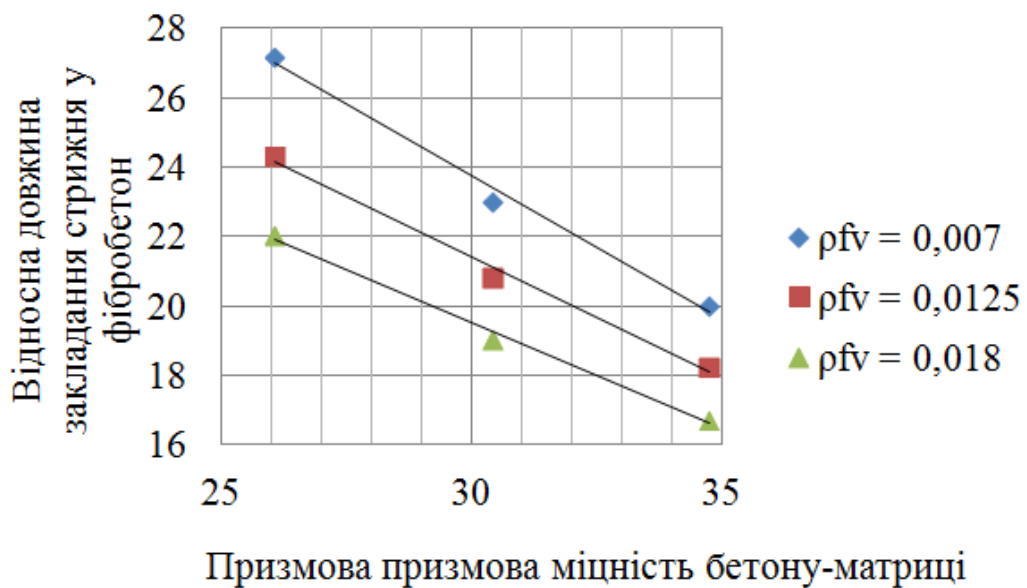


Рис. 3.11 – Залежність « $\frac{l_b}{\phi} - f_{cm,prism}$ » за $\sigma_S = 500$ МПа на початку зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 10 мм

Таблиця 3.11 – Розрахунок дисперсії адекватності для функції τ_{b0}

Точки плану	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	\hat{y}_u	\bar{y}_u	$\hat{y}_u - \bar{y}_u$	$(\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2$
1	6	+0,86	0	+0,57	+0,09	0	+0,08	0	0	0	0	7,60	7,62	-0,02	0,0004
2	6	+0,86	0	+0,57	-0,09	0	+0,08	0	0	0	0	7,42	7,39	0,03	0,0009
3	6	+0,86	0	-0,57	+0,09	0	-0,08	0	0	0	0	6,30	6,29	0,01	1E-04
4	6	+0,86	0	-0,57	-0,09	0	-0,08	0	0	0	0	6,12	6,11	0,01	1E-04
5	6	+0,86	0	+0,57	+0,09	0	+0,08	0	0	0	0	7,60	7,62	-0,02	0,0004
6	6	+0,86	0	+0,57	-0,09	0	+0,08	0	0	0	0	7,42	7,39	0,03	0,0009
7	6	+0,86	0	-0,57	+0,09	0	-0,08	0	0	0	0	6,30	6,30	0	0
8	6	+0,86	0	-0,57	-0,09	0	-0,08	0	0	0	0	6,12	6,11	0,01	1E-04
9	6	-0,86	0	+0,57	+0,09	0	-0,08	0	0	0	0	5,72	5,72	0	0
10	6	-0,86	0	+0,57	-0,09	0	-0,08	0	0	0	0	5,54	5,55	-0,01	1E-04
11	6	-0,86	0	-0,57	+0,09	0	+0,08	0	0	0	0	4,74	4,72	0,02	0,0004
12	6	-0,86	0	-0,57	-0,09	0	+0,08	0	0	0	0	4,56	4,58	-0,02	0,0004
13	6	-0,86	0	+0,57	+0,09	0	-0,08	0	0	0	0	5,72	5,72	0	0
14	6	-0,86	0	+0,57	-0,09	0	-0,08	0	0	0	0	5,54	5,55	-0,01	1E-04
15	6	-0,86	0	-0,57	+0,09	0	+0,08	0	0	0	0	4,74	4,72	0,02	0,0004
16	6	-0,86	0	-0,57	-0,09	0	+0,08	0	0	0	0	4,56	4,58	-0,02	0,0004
Сума															0,0047

Таблиця 3.12 – До визначення коефіцієнта варіації v відношення теоретичних значень $\tau_{b0,theor}$ до середніх експериментальних $\tau_{S0,exp}$

Марки зразків	$\tau_{b0,theor}$, МПа	$\tau_{b0,exp}$, МПа	$\frac{\tau_{b0,theor}}{\tau_{b0,exp}}$	$\left(\frac{\tau_{b0,theor}}{\tau_{b0,exp}}\right)_m$	Δ	Δ^2	S	v
3.3PF12.144	7,60	7,62	0,997375	1,000242	0,002867	8,21717E-06	0,00299139	0,00299067
3.3PF8.96	7,42	7,39	1,00406		-0,00382	1,45745E-05		
3.1PF12.144	6,3	6,29	1,00159		-0,00135	1,81693E-06		
3.1PF8.96	6,12	6,11	1,001637		-0,00139	1,94539E-06		
3.3PF12.96	7,6	7,62	0,997375		0,002867	8,21717E-06		
3.3PF8.64	7,42	7,39	1,00406		-0,00382	1,45745E-05		
3.1PF12.96	6,30	6,30	1		0,000242	5,85105E-08		
3.1PF8.64	6,12	6,11	1,001637		-0,00139	1,94539E-06		
1.3PF12.144	5,72	5,72	1		0,000242	5,85105E-08		
1.3PF8.96	5,54	5,55	0,998198		0,002044	4,17667E-06		
1.1PF12.144	4,74	4,72	1,004237		-0,004	1,59632E-05		
1.1PF8.96	4,56	4,58	0,995633		0,004609	2,12401E-05		
1.3PF12.96	5,72	5,72	1		0,000242	5,85105E-08		
1.3PF8.64	5,54	5,55	0,998198		0,002044	4,17667E-06		
1.1PF12.96	4,74	4,72	1,004237		-0,004	1,59632E-05		
1.1PF8.64	4,56	4,58	0,995633		0,004609	2,12401E-05		

$$\Delta_i = \left(\frac{\tau_{b0,theor}}{\tau_{b0,exp}}\right)_i - \left(\frac{\tau_{b0,theor}}{\tau_{b0,exp}}\right)_m; S = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}}; n=16; v = S / \left(\frac{\tau_{b0,theor}}{\tau_{b0,exp}}\right)_m$$

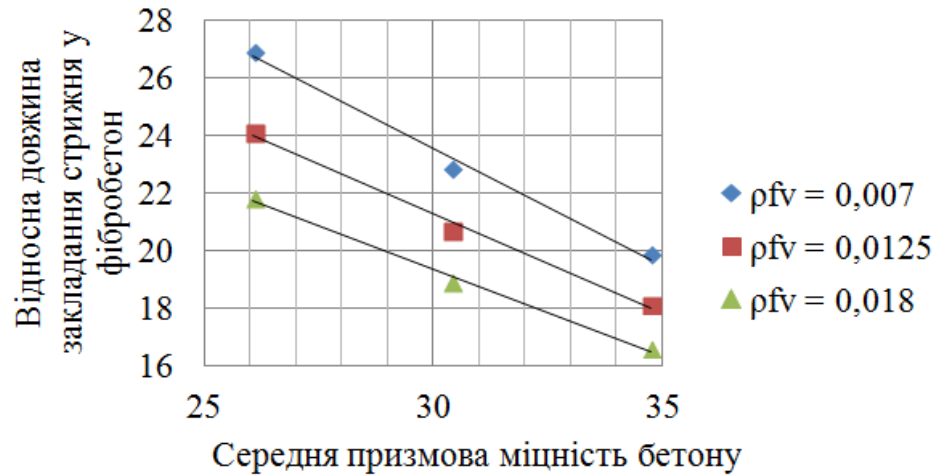


Рис. 3.12 – Залежність « $\frac{l_b}{\phi} - f_{cm,prism}$ » при $\sigma_S = 500$ МПа на початку зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 12 мм

3.2.2. Математичні моделі для визначення максимальних напружень у стрижневій арматурі та максимальних напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном

Мета цих досліджень – вивчення впливу вмісту фібри в одиниці об'єму бетону, відносної довжини закладання стрижнів у бетон, міцності бетону і діаметра стрижнів на максимальні напруження, що виникають у перерізах на завантажуваних кінцях цих стрижнів $\sigma_{S,max}$, а також на дотичні напруження в зоні контакту стрижнів з фібробетоном $\tau_{b,max}$ і розроблення відповідних математичних моделей.

Умови планування повного чотирифакторного експерименту (ПФЕ 2⁴) експерименту подано в таблиці 3.2, а матриця планування та експериментальні значення максимальних напружень в арматурі за витягування стрижнів з фібробетонних призм $\sigma_{S,max}$ – у таблиці 3.13.

Для отримання рівняння регресії у вигляді формули (3.1) знаходили вільний член рівняння регресії за формулою (3.2) (таблиця 3.13):

$$b_0 = \frac{\sum_1^N \bar{y}_u}{N} = \frac{7590,27}{16} = 474,39.$$

Після цього за формулами (3.3) і (3.4) і даними таблиці 3.14 знаходили коефіцієнти лінійних членів рівняння регресії і коефіцієнти парних взаємодій:

$$b_1 = \frac{1026,19}{16} = 64,14; b_2 = \frac{1462,63}{16} = 91,41; b_3 = \frac{658,07}{16} = 41,13;$$

Таблиця 3.13 – Матриця планування та експериментальні значення максимальних напружень в арматурі $\sigma_{S,max}$ за витягування з фібробетону призматичних зразків

Марки зразків	Точка плану	Фактори				Максимальні напруження в арматурі $\sigma_{S,max}$, МПа			Середнє значення максимальних напружень в арматурі $\sigma_{S,max,m}$, МПа
		X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	
3.3PF12.144	1	+1	+1	+1	+1	692,44	693,39	688,91	691,58
3.3PF8.96	2	+1	+1	+1	-1	674,81	674,34	672,61	673,92
3.1PF12.144	3	+1	+1	-1	+1	613,59	599,18	600,28	604,35
3.1PF8.96	4	+1	+1	-1	-1	584,67	592,88	581,11	586,22
3.3PF12.96	5	+1	-1	+1	+1	491,39	479,93	491,84	487,72
3.3PF8.64	6	+1	-1	+1	-1	474,88	477,58	466,27	472,91
3.1PF12.96	7	+1	-1	-1	+1	409,01	391,58	408,11	402,90
3.1PF8.64	8	+1	-1	-1	-1	385,55	389,75	390,59	388,63
1.3PF12.144	9	-1	+1	+1	+1	553,77	537,96	554,79	548,84
1.3PF8.96	10	-1	+1	+1	-1	534,31	536,61	520,19	530,37
1.1PF12.144	11	-1	+1	-1	+1	454,71	445,55	459,91	453,39
1.1PF8.96	12	-1	+1	-1	-1	431,88	438,68	442,78	437,78
1.3PF12.96	13	-1	-1	+1	+1	354,97	365,66	377,04	365,89
1.3PF8.64	14	-1	-1	+1	-1	353,1	353,19	352,53	352,94
1.1PF12.96	15	-1	-1	-1	+1	301,74	295,71	309,33	302,26
1.1PF8.64	16	-1	-1	-1	-1	290,64	287,78	293,29	290,57
Сума									7590,27
									$b_0 = 474,39$
Результати подано як середні для трьох зразків-близнюків									

$$b_4 = \frac{123,59}{16} = 7,72;$$

$$b_{12} = \frac{145,19}{16} = 9,07;$$

$$b_{13} = \frac{29,99}{16} = 1,87;$$

$$b_{14} = \frac{6,15}{16} = 0,38;$$

$$b_{23} = \frac{67,87}{16} = 4,24;$$

$$b_{24} = \frac{16,15}{16} = 1,01;$$

$$b_{34} = \frac{4,19}{16} = 0,26.$$

Для визначення значущості цих коефіцієнтів визначаємо дисперсію відтворюваності за рядками матриці (таблиця 3.15). Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ знаходили за формулою (3.5):

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - y_m)^2}{N(r-1)} = \frac{1438,216}{16(3-1)} = 44,94.$$

Середньоквадратичне відхилення визначаємо за формулою (3.6):

$$S_{(y)} = \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{44,94} = 6,70.$$

Середньоквадратична помилка (формула (3.7)):

$$S_{(b_0)} = S_{(b_i)} = S_{(b_{ij})} = \frac{S_{(y)} = 6,70}{\sqrt{N} \sqrt{16}} = 1,676.$$

Табличне значення t -критерію Стьюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$ ($P = 95\%$) дорівнює 2,04 [42], що відповідає числу ступенів свободи $f_y = N(r-1) = 16(3-1) = 32$.

З таблиці 3.14 вибираємо найменші значення коефіцієнтів рівняння регресії і знаходимо розрахункові значення t_p за формулою (3.10):

$$t_p = \frac{|b_{13}|}{S_{(b_{13})}} = \frac{1,87}{1,676} = 1,12 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{14}|}{S_{(14)}} = \frac{0,38}{1,676} = 0,23 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{24}|}{S_{(24)}} = \frac{1,01}{1,676} = 0,60 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{34}|}{S_{(34)}} = \frac{0,26}{1,676} = 0,16 < t = 2,04.$$

Отже, ці коефіцієнти є незначущими, і рівняння регресії у кодованому виді має вигляд:

$$Y = 474,39 + 64,14X_1 + 91,41X_2 + 41,13X_3 + 7,72X_4 + 9,07X_1X_2 + 4,24X_2X_3 \quad (3.22)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення Y для кожного рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (таблиця 3.15).

Дисперсію адекватності розраховано за даними таблиці 3.16 і формулою (3.12):

$$S_{\text{аа}}^2 = \frac{r(\sum_{r=1}^{N_i} (y_i - y_m)^2)}{N_1 - m} = \frac{3 \cdot 249,8943}{16 - 7} = 83,298.$$

Таблиця 3.14 – Коефіцієнти рівняння регресії функції $\sigma_{S, \max}$

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів									
за лінійних членів				за взаємодій					
$\bar{y}\bar{o}_1$	$\bar{y}\bar{o}_2$	$\bar{y}\bar{o}_3$	$\bar{y}\bar{o}_4$	$\bar{y}\bar{o}_1 \bar{o}_2$	$\bar{y}\bar{o}_1 \bar{o}_3$	$\bar{y}\bar{o}_1 \bar{o}_4$	$\bar{y}\bar{o}_2 \bar{o}_3$	$\bar{y}\bar{o}_2 \bar{o}_4$	$\bar{y}\bar{o}_3 \bar{o}_4$
+691,58	+691,58	+691,58	+691,58	+691,58	+691,58	+691,58	+691,58	+691,58	+691,58
+673,92	+673,92	+673,92	-673,92	+673,92	+673,92	-673,92	+673,92	-673,92	-673,92
+604,35	+604,35	-604,35	+604,35	+604,35	-604,35	-604,35	-604,35	+604,35	-604,35
+586,22	+586,22	-586,22	-586,22	+586,22	-586,22	-586,22	-586,22	-586,22	+586,22
+487,72	-487,72	+487,72	+487,72	-487,72	+487,72	+487,72	-487,72	+487,72	+487,72
+472,91	-472,91	+472,91	-472,91	-472,91	+472,91	-472,91	-472,91	+472,91	-472,91
+402,90	-402,90	-402,90	+402,90	-402,90	-402,90	+402,90	+402,90	+402,90	-402,90
+388,63	-388,63	-388,63	-388,63	-388,63	-388,63	-388,63	+388,63	+388,63	+388,63
-548,84	+548,84	+548,84	+548,84	-548,84	-548,84	-548,84	+548,84	+548,84	+548,84
-530,37	+530,37	+530,37	-530,37	-530,37	-530,37	+530,37	+530,37	-530,37	-530,37
-453,39	+453,39	-453,39	+453,39	-453,39	+453,39	-453,39	-453,39	+453,39	-453,39
-437,78	+437,78	-437,78	-437,78	-437,78	+437,78	+437,78	-437,78	-437,78	+437,78
-365,89	-365,89	+365,89	+365,89	+365,89	-365,89	-365,89	-365,89	-365,89	+365,89
-352,94	-352,94	+352,94	-352,94	+352,94	-352,94	+352,94	-352,94	+352,94	-352,94
-302,26	-302,26	-302,26	+302,26	+302,26	+302,26	-302,26	+302,26	-302,26	-302,26
-290,57	-290,57	-290,57	-290,57	+290,57	+290,57	+290,57	+290,57	+290,57	+290,57
$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$
+1026,19	+1462,63	+658,07	+123,59	+145,19	+29,99	+6,15	+67,87	+16,15	+4,19
$b_1=$	$b_2=$	$b_3=$	$b_4=$	$b_{12}=$	$b_{13}=$	$b_{14}=$	$b_{23}=$	$b_{24}=$	$b_{34}=$
64,14	91,41	41,13	7,72	9,07	1,87	0,38	4,24	1,01	0,26

Розрахункове значення критерію Фішера за формулою (3.14):

$$F_p = \frac{S_{\text{аа}}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{83,298}{44,94} = 1,85.$$

Табличне значення критерію Фішера F_T при $f_1 = 16(3 - 1) = 32$ і $f_2 = 16 - 7 = 9$ за інтерполяцією дорівнює 2,29. Отже, $F_p < F_T$, тому рівняння регресії є адекватним.

Рівняння (3.22) можна записати у натуральному вигляді:

$$\sigma_{S,max} = 474,39 + 64,14 \frac{f_{cm,prism-30,41}}{4,34} + 91,41 \frac{l_b/\emptyset-10}{2} + 41,13 \frac{\rho_{fv}-0,0125}{0,0055} + 7,72 \frac{\emptyset-10}{2} + 9,07 \left(\frac{f_{cm,prism-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_b/\emptyset-10}{2} \right) + 4,24 \left(\frac{l_b/\emptyset-10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}-0,0125}{0,0055} \right). \quad (3.23)$$

Таблиця 3.15 – Розрахунок дисперсії відтворюваності функції $\sigma_{S,max}$ за рядками матриці

Точки плану u	$(y_1-y_m)^2$	$(y_2-y_m)^2$	$(y_3-y_m)^2$	$\sum S_{(y)}^2$
1	0,7396	3,2761	7,1289	11,1446
2	0,7921	0,1764	1,7161	2,6846
3	85,3776	26,7289	16,5649	128,671
4	2,4025	44,3556	26,1121	72,8702
5	13,4689	60,6841	16,9744	91,1274
6	3,8809	21,8089	44,0896	69,7794
7	37,3321	128,142	27,1441	192,619
8	9,4864	1,2544	3,8416	14,5824
9	24,3049	118,374	35,4025	178,082
10	15,5236	38,9376	103,632	158,094
11	1,7424	61,4656	42,5104	105,718
12	34,8100	0,8100	25,0000	60,6200
13	119,246	0,0529	124,323	243,622
14	0,0256	0,0625	0,1681	0,2562
15	0,2704	42,9025	49,9849	93,1578
16	0,0049	7,7841	7,3984	15,1874
Сума				1438,216

Статистичний аналіз відношень теоретичних значень $\sigma_{S,max}$ до середніх експериментальних засвідчив, що середньоквадратичне відхилення $S = 0,008404$, а коефіцієнт варіації $v = 0,84\%$ (таблиця 3.17).

Аналізуючи рівняння (3.23), можна зауважити, що за нульового рівня варіювання (бетон класу C25/30 з $f_{cm,prism} = 30,41$ МПа, відносна довжина закладання стрижнів у фібробетон $l_b/\emptyset = 10$, коефіцієнт армування фіброю за об'ємом $\rho_{fv} = 0,0125$, діаметр стрижнів $\emptyset = 10$ мм) максимальні напруження в арматурі за витягування $\sigma_{S,max} = 474,39$ МПа. На верхньому рівні варіювання (бетон класу C30/35 з $f_{cm,prism} = 34,75$ МПа, відносна довжина

закладання стрижнів у фібробетон $l_b/\phi = 12$, коефіцієнт армування фіброю за об'ємом $\rho_{fv} = 0,018$, діаметр стрижнів $\phi = 12$ мм) $\sigma_{S,max} = 695,36$ МПа.

За витягування стрижнів зі зразків 3.3PF12.44, 3.3PF8.96, 3.1PF12.144, 3.1PF8.96, 1.3PF12.144, 1.3PF8.96 максимальні напруження $\sigma_{S,max}$ перевищували характеристичне значення міцності арматури класу А500С, а за витягування стрижнів зі зразків 3.3PF12.96, 3.3PF8.64, 1.1PF12.144, 1.1PF8.96 максимальні напруження $\sigma_{S,max}$ перевищували розрахункове значення міцності цієї арматури.

Умови планування експерименту для отримання математичної моделі максимальних напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном прийняті такими ж, як і за вивчення напружень у завантажуваних кінцях стрижнів на початкові зсуву (таблиця 3.2). Середні максимальні дотичні напруження зчеплення стрижнів з фібробетоном $\tau_{b,max}$ знаходили з умови рівності зовнішнього витягувального зусилля і зусилля зчеплення:

$$N_{S,max} = \pi\phi l_b \tau_{b,max}. \quad (3.24)$$

Матрицю планування експерименту подано в таблиці 3.18.

Вільний член рівняння регресії визначали за формулою (3.2) і даними таблиці 3.18:

$$b_0 = \frac{\sum_1^N \bar{y}_u}{N} = \frac{190,05}{16} = 11,88.$$

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів рівняння регресії за лінійних членів і за взаємодій подано в таблиці 3.19.

Коефіцієнти рівняння регресії $b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ визначали за формулами (3.3) та (3.4) і даними таблиці 3.19:

$$b_1 = \frac{25,97}{16} = 1,62; b_2 = \frac{-1,45}{16} = -0,09; b_3 = \frac{16,77}{16} = 1,05; b_4 = \frac{3,13}{16} = 0,2;$$

$$b_{12} = \frac{-1,57}{16} = -0,1;$$

Таблиця 3.16– Розрахунок дисперсії адекватності для функції $\sigma_{S,max}$

Точки плану	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	Y	Y _m	$\frac{Y-Y_m}{Y_m}$	$(Y-Y_m)^2$
1	474,39	+64,14	+91,41	+41,13	+7,72	+9,07	+3,26	0	+4,24	0	0	695,36	691,58	3,78	14,2884
2	474,39	+64,14	+91,41	+41,13	-7,72	+9,07	+3,26	0	+4,24	0	0	679,92	673,92	6,00	36,0000
3	474,39	+64,14	+91,41	-41,13	+7,72	+9,07	-3,26	0	-4,24	0	0	598,1	604,35	-6,25	39,0625
4	474,39	+64,14	+91,41	-41,13	-7,72	+9,07	-3,26	0	-4,24	0	0	582,66	586,22	-3,56	12,6736
5	474,39	+64,14	-91,41	+41,13	+7,72	-9,07	+3,26	0	-4,24	0	0	485,92	487,72	-1,8	3,2400
6	474,39	+64,14	-91,41	+41,13	-7,72	-9,07	+3,26	0	-4,24	0	0	470,48	472,91	-2,43	5,9049
7	474,39	+64,14	-91,41	-41,13	+7,72	-9,07	-3,26	0	+4,24	0	0	405,62	402,90	2,72	7,3984
8	474,39	+64,14	-91,41	-41,13	-7,72	-9,07	-3,26	0	+4,24	0	0	390,18	388,63	1,55	2,4025
9	474,39	-64,14	+91,41	+41,13	+7,72	-9,07	-3,26	0	+4,24	0	0	542,42	548,84	-6,42	41,2164
10	474,39	-64,14	+91,41	+41,13	-7,72	-9,07	-3,26	0	+4,24	0	0	526,98	530,37	-3,39	11,4921
11	474,39	-64,14	+91,41	-41,13	+7,72	-9,07	+3,26	0	-4,24	0	0	458,2	453,39	4,81	23,1361
12	474,39	-64,14	+91,41	-41,13	-7,72	-9,07	+3,26	0	-4,24	0	0	442,76	437,78	4,98	24,8004
13	474,39	-64,14	-91,41	+41,13	+7,72	+9,07	-3,26	0	-4,24	0	0	369,26	365,89	3,37	11,3569
14	474,39	-64,14	-91,41	+41,13	-7,72	+9,07	-3,26	0	-4,24	0	0	353,82	352,94	0,88	0,7744
15	474,39	-64,14	-91,41	-41,13	+7,72	+9,07	+3,26	0	+4,24	0	0	302	302,26	-0,26	0,0676
16	474,39	-64,14	-91,41	-41,13	-7,72	+9,07	+3,26	0	+4,24	0	0	286,56	290,57	-4,01	16,0801
Сума															249,8943

Таблиця 3.17 – До визначення коефіцієнта варіації v відношення теоретичних значень $\sigma_{S,max,theor}$ до середніх експериментальних $\sigma_{S,max,exp}$

Марки зразків	$\sigma_{S,max,theor}$, МПа	$\sigma_{S,max,exp}$, МПа	$\frac{\sigma_{S,max,theor}}{\sigma_{S,max,exp}}$	$\left(\frac{\sigma_{S,max,theor}}{\sigma_{S,max,exp}}\right)_m$	Δ	Δ^2	S	v
3.3PF12.144	695,36	691,58	0,994564	1,000016	0,005452	2,97233E-05	0,008404	0,008404
3.3PF8.96	679,92	673,92	0,991175		0,008841	7,81616E-05		
3.1PF12.144	598,1	604,35	1,01045		-0,01043	0,00010887		
3.1PF8.96	582,66	586,22	1,00611		-0,00609	3,7138E-05		
3.3PF12.96	485,92	487,72	1,003704		-0,00369	1,3602E-05		
3.3PF8.64	470,48	472,91	1,005165		-0,00515	2,65132E-05		
3.1PF12.96	405,62	402,9	0,993294		0,006722	4,5184E-05		
3.1PF8.64	390,18	388,63	0,996027		0,003989	1,59114E-05		
1.3PF12.144	542,42	548,84	1,011836		-0,01182	0,000139715		
1.3PF8.96	526,98	530,37	1,006433		-0,00642	4,11791E-05		
1.1PF12.144	458,2	453,39	0,989502		0,010514	0,000110542		
1.1PF8.96	442,76	437,78	0,988752		0,011264	0,000126876		
1.3PF12.96	369,26	365,89	0,990874		0,009142	8,35745E-05		
1.3PF8.64	353,82	352,94	0,997513		0,002503	6,26454E-06		
1.1PF12.96	302	302,26	1,00086		-0,00084	7,12493E-07		
1.1PF8.64	286,56	290,57	1,013994		-0,01398	0,000195387		

$$\Delta_i = \left(\frac{\sigma_{S,max,theor}}{\sigma_{S,max,exp}}\right)_i - \left(\frac{\sigma_{S,max,theor}}{\sigma_{S,max,exp}}\right)_m; S = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}}; n=16; v = S / \left(\frac{\sigma_{S,max,theor}}{\sigma_{S,max,exp}}\right)_m$$

Таблиця 3.18 – Матриця планування та експериментальні значення дотичних напружень між стрижнями і фібробетоном $\tau_{b,max}$

Точка плану	Фактори				Максимальні дотичні напруження за витягування стрижнів $\tau_{b,max}$, МПа			Середнє значення максимальних дотичних напружень за витягування стрижнів $\tau_{b,max,m}$
	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	
1	+1	+1	+1	+1	14,43	14,45	14,35	14,41
2	+1	+1	+1	-1	14,06	14,05	14,01	14,04
3	+1	+1	-1	+1	12,78	12,48	12,51	12,59
4	+1	+1	-1	-1	12,18	12,35	12,11	12,21
5	+1	-1	+1	+1	15,36	15,00	15,37	15,24
6	+1	-1	+1	-1	14,84	14,92	14,57	14,78
7	+1	-1	-1	+1	12,78	12,24	12,75	12,59
8	+1	-1	-1	-1	12,05	12,18	12,21	12,15
9	-1	+1	+1	+1	11,54	11,21	11,56	11,43
10	-1	+1	+1	-1	11,13	11,18	10,84	11,05
11	-1	+1	-1	+1	9,47	9,28	9,58	9,45
12	-1	+1	-1	-1	9,00	9,14	9,22	9,12
13	-1	-1	+1	+1	11,09	11,43	11,78	11,43
14	-1	-1	+1	-1	11,03	11,04	11,02	11,03
15	-1	-1	-1	+1	9,43	9,24	9,67	9,45
16	-1	-1	-1	-1	9,08	8,99	9,17	9,08
Сума								190,05
								$b_0 = 11,88$

$$b_{13} = \frac{+1,09}{16} = 0,07;$$

$$b_{14} = \frac{0,17}{16} = 0,01;$$

$$b_{23} = \frac{-1,65}{16} = -0,01;$$

$$b_{24} = \frac{-0,21}{16} = -0,01;$$

$$b_{34} = \frac{0,09}{16} = 0,01.$$

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ знаходили за даними таблиці 3.20 і формулою (3.5):

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)} = \frac{1,0102}{16(3-1)} = 0,03157.$$

Таблиця 3.19 – Коефіцієнти рівняння регресії функції $\tau_{b,max}$

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів									
при лінійних членах				при взаємодіях					
$\bar{y}\bar{\delta}_1$	$\bar{y}\bar{\delta}_2$	$\bar{y}\bar{\delta}_3$	$\bar{y}\bar{\delta}_4$	$\bar{y}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_2$	$\bar{y}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_3$	$\bar{y}\bar{\delta}_1\bar{\delta}_4$	$\bar{y}\bar{\delta}_2\bar{\delta}_3$	$\bar{y}\bar{\delta}_2\bar{\delta}_4$	$\bar{y}\bar{\delta}_3\bar{\delta}_4$
+14,41	+14,41	+14,41	+14,41	+14,41	+14,41	+14,41	+14,41	+14,41	+14,41
+14,04	+14,04	+14,04	-14,04	+14,04	+14,04	-14,04	+14,04	-14,04	-14,04
+12,59	+12,59	-12,59	+12,59	+12,59	-12,59	+12,59	-12,59	+12,59	-12,59
+12,21	+12,21	-12,21	-12,21	+12,21	-12,21	-12,21	-12,21	-12,21	+12,21
+15,24	-15,24	+15,24	+15,24	-15,24	+15,24	+15,24	-15,24	-15,24	+15,24
+14,78	-14,78	+14,78	-14,78	-14,78	+14,78	-14,78	-14,78	+14,78	-14,78
+12,59	-12,59	-12,59	+12,59	-12,59	-12,59	+12,59	+12,59	-12,59	-12,59
+12,15	-12,15	-12,15	-12,15	-12,15	-12,15	-12,15	+12,15	+12,15	+12,15
-11,43	+11,43	+11,43	+11,43	-11,43	-11,43	-11,43	+11,43	+11,43	+11,43
-11,05	+11,05	+11,05	-11,05	-11,05	-11,05	+11,05	+11,05	-11,05	-11,05
-9,45	+9,45	-9,45	+9,45	-9,45	+9,45	-9,45	-9,45	+9,45	-9,45
-9,12	+9,12	-9,12	-9,12	-9,12	+9,12	+9,12	-9,12	-9,12	+9,12
-11,43	-11,43	+11,43	+11,43	+11,43	-11,43	-11,43	-11,43	-11,43	+11,43
-11,03	-11,03	+11,03	-11,03	+11,03	-11,03	+11,03	-11,03	+11,03	-11,03
-9,45	-9,45	-9,45	+9,45	+9,45	+9,45	-9,45	+9,45	-9,45	-9,45
-9,08	-9,08	-9,08	-9,08	+9,08	+9,08	+9,08	+9,08	+9,08	+9,08
$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$
+25,97	-1,45	+16,77	+3,13	-1,57	+1,09	+0,17	-1,65	-0,21	+0,09
$b_1 =$	$b_2 =$	$b_3 =$	$b_4 =$	$b_{12} =$	$b_{13} =$	$b_{14} =$	$b_{23} =$	$b_{24} =$	$b_{34} =$
+1,62	-0,09	+1,05	+0,20	-0,10	+0,07	+0,01	-0,10	-0,01	+0,01

Середньоквадратичне відхилення визначаємо за формулою (3.6):

$$S_{\{y\}} = \sqrt{S_{\{y\}}^2} = \sqrt{0,03157} = 0,1777.$$

Середньоквадратична помилка (формула (3.7)):

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{S_{\{y\}} \cdot 0,1777}{\sqrt{N} \cdot \sqrt{16}} = 0,0444.$$

Табличне значення t -критерію Стьюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$ ($P = 95\%$) дорівнює 2,04, що відповідає числу ступенів свободи $f_y = N(r-1) = 16(3-1) = 32$.

Таблиця 3.20 – Розрахунок дисперсії відтворюваності функції $\tau_{b,max}$ за рядками матриці

Точки плану u	$(y_1 - \bar{y}_m)^2$	$(y_2 - \bar{y}_m)^2$	$(y_3 - \bar{y}_m)^2$	$\sum S_{\{y\}}^2$
1	0,0004	0,0016	0,0036	0,0056
2	0,0004	0,0001	0,0009	0,0014
3	0,0361	0,0121	0,0064	0,0546
4	0,0009	0,0196	0,01	0,0305
5	0,0144	0,0576	0,0169	0,0889
6	0,0036	0,0196	0,0441	0,0673
7	0,0361	0,1225	0,0256	0,1842
8	0,01	0,0009	0,0036	0,0145
9	0,0121	0,0484	0,0169	0,0774
10	0,0064	0,0169	0,0441	0,0674
11	0,0004	0,0289	0,0169	0,0462
12	0,0144	0,0004	0,01	0,0248
13	0,1156	0	0,1225	0,2381
14	0	1E-04	1E-04	0,0002
15	0,0004	0,0441	0,0484	0,0929
16	0	0,0081	0,0081	0,0162
Сума				1,0102

З таблиці 3.19 вибираємо найменші значення коефіцієнтів рівняння регресії і знаходимо розрахункові значення t_p за формулою (3.10):

$$t_p = \frac{|b_2|}{S_{\{b_{34}\}}} = \frac{0,09}{0,0444} = 2,03 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{13}|}{S_{\{13\}}} = \frac{0,07}{0,0444} = 1,57 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{14}|}{S_{\{24\}}} = \frac{0,01}{0,0444} = 0,23 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{24}|}{S_{\{24\}}} = \frac{0,01}{0,0444} = 0,23 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{34}|}{S_{\{24\}}} = \frac{0,01}{0,0444} = 0,23 < t = 2,04.$$

Таким чином, $b_2, b_{13}, b_{14}, b_{24}, b_{34}$ є незначущими і рівняння регресії у кодованому виді має вигляд:

$$\hat{y} = 11,88 + 1,62x_1 + 1,05x_3 + 0,2x_4 - 0,1x_1x_2 - 0,1x_2x_3. \quad (3.25)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення u для кожного рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (таблиця 3.21).

Дисперсію адекватності визначаємо за формулою (3.12):

$$S_{\text{ää}}^2 = \frac{r(\sum_{r=1}^{N_i} (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2)}{N_1 - m} = \frac{3 \cdot 0,3745}{16 - 6} = 0,112.$$

Табличне значення критерію Фішера F_T при $f_1 = 16(3 - 1) = 32$ і $f_2 = 16 - 6 = 10$ за інтерполяцією дорівнює 2,71, а розрахункове $F_p = 0,28$. Отже, $F_p < F_T$, тому рівняння регресії є адекватним.

Статистичний аналіз відношень теоретичних значень $\tau_{s,max}$ до середніх експериментальних засвідчив, що середньоквадратичне відхилення $S = 0,0141$, а коефіцієнт варіації $v = 1,41\%$ (таблиця 3.22).

Таким чином, рівняння для визначення максимальних дотичних напружень за витягування стрижнів з фібробетонних призм має такий натуральний вигляд:

$$\tau_{b,max} = 11,88 + 1,62 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 1,05 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 0,2 \frac{\phi - 10}{2} - 0,1 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_b / \phi - 10}{2} \right) + 0,1 \left(\frac{l_b / \phi - 10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right). \quad (3.26)$$

Аналіз рівняння (3.26) свідчить, що за нульового рівня варіювання значення $\tau_{b,max} = 11,88$ МПа. Найбільше на приріст дотичних напружень впливає збільшення призмової міцності бетону $f_{cm,prism}$. Її підвищення з 30,41 МПа до 34,75 МПа зумовлює приріст напружень $\tau_{b,max}$, що дорівнює 1,62 МПа. Підвищення коефіцієнта фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} з 0,0125 до 0,018 призводить до збільшення $\tau_{b,max}$ на 1,05 МПа. Збільшення діаметра стрижнів ϕ з 10 мм до 12 мм забезпечило приріст дотичних напружень на 0,2 МПа, що свідчить про несуттєву різницю індексів $\text{Re}ma_{fv}(0,0565$ і $0,0572$ для стрижнів діаметром 8 мм і 12 мм відповідно).

Таблиця 3.21 – Розрахунок дисперсії адекватності для функції $\tau_{b,max}$

Точки плану	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	\hat{y}_u	\bar{y}_u	$\hat{y}_u - \bar{y}_u$	$(\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2$
1	11,88	+1,62	0	+1,05	+0,2	+(-0,1)	0	0	+(-0,1)	0	0	14,55	14,41	0,14	0,0196
2	11,88	+1,62	0	+1,05	-0,2	+(-0,1)	0	0	+(-0,1)	0	0	14,15	14,04	0,11	0,0121
3	11,88	+1,62	0	-1,05	+0,2	+(-0,1)	0	0	-(-0,1)	0	0	12,65	12,59	0,06	0,0036
4	11,88	+1,62	0	-1,05	-0,2	+(-0,1)	0	0	-(-0,1)	0	0	12,25	12,21	0,04	0,0016
5	11,88	+1,62	0	+1,05	+0,2	-(-0,1)	0	0	-(-0,1)	0	0	14,95	15,24	-0,29	0,0841
6	11,88	+1,62	0	+1,05	-0,2	-(-0,1)	0	0	-(-0,1)	0	0	14,55	14,78	-0,23	0,0529
7	11,88	+1,62	0	-1,05	+0,2	-(-0,1)	0	0	+(-0,1)	0	0	12,65	12,59	0,06	0,0036
8	11,88	+1,62	0	-1,05	-0,2	-(-0,1)	0	0	+(-0,1)	0	0	12,25	12,15	0,1	0,01
9	11,88	-1,62	0	+1,05	+0,2	-(-0,1)	0	0	+(-0,1)	0	0	11,51	11,43	0,08	0,0064
10	11,88	-1,62	0	+1,05	-0,2	-(-0,1)	0	0	+(-0,1)	0	0	11,11	11,05	0,06	0,0036
11	11,88	-1,62	0	-1,05	+0,2	-(-0,1)	0	0	-(-0,1)	0	0	9,61	9,45	0,16	0,0256
12	11,88	-1,62	0	-1,05	-0,2	-(-0,1)	0	0	-(-0,1)	0	0	9,21	9,12	0,09	0,0081
13	11,88	-1,62	0	+1,05	+0,2	+(-0,1)	0	0	-(-0,1)	0	0	11,51	11,43	0,08	0,0064
14	11,88	-1,62	0	+1,05	-0,2	+(-0,1)	0	0	-(-0,1)	0	0	11,11	11,03	0,08	0,0064
15	11,88	-1,62	0	-1,05	+0,2	+(-0,1)	0	0	+(-0,1)	0	0	9,21	9,45	-0,24	0,0576
16	11,88	-1,62	0	-1,05	-0,2	+(-0,1)	0	0	+(-0,1)	0	0	8,81	9,08	-0,27	0,0729
Сума															0,3745

Таблиця 3.22 – До визначення коефіцієнта варіації v відношення теоретичних значень $\tau_{b,max,theor}$ до середніх експериментальних $\tau_{b,max,exp}$

Марки зразків	$\tau_{b,max,theor}$, МПа	$\tau_{b,max,exp}$, МПа	$\frac{\tau_{b,max,theor}}{\tau_{b,max,exp}}$	$\left(\frac{\tau_{b,max,theor}}{\tau_{b,max,exp}}\right)_m$	Δ	Δ^2	S	v
3.3PF12.144	14,55	14,41	1,0097	1,000147	0,0096	9,16E-05	0,01409	0,01409
3.3PF8.96	14,15	14,04	1,0078		0,0076	5,76E-05		
3.1PF12.144	12,65	12,59	1,0048		0,0045	2,04E-05		
3.1PF8.96	12,25	12,21	1,0033		0,0030	9,17E-06		
3.3PF12.96	14,95	15,24	0,9810		-0,0193	0,000372		
3.3PF8.64	14,55	14,78	0,9844		-0,0158	0,00025		
3.1PF12.96	12,65	12,59	1,0048		0,0045	2,04E-05		
3.1PF8.64	12,25	12,15	1,0082		0,0080	6,37E-05		
1.3PF12.144	11,51	11,43	1,0070		0,0068	4,56E-05		
1.3PF8.96	11,11	11,05	1,0054		0,0052	2,69E-05		
1.1PF12.144	9,61	9,45	1,0169		0,0167	0,000278		
1.1PF8.96	9,21	9,12	1,0099		0,0096	9,26E-05		
1.3PF12.96	11,51	11,43	1,0070		0,0068	4,56E-05		
1.3PF8.64	11,11	11,03	1,0073		0,0070	4,91E-05		
1.1PF12.96	9,21	9,45	0,9746		-0,0256	0,000658		
1.1PF8.64	8,81	9,08	0,9703		-0,0300	0,000899		

$$\Delta_i = \left(\frac{\tau_{b,max,theor}}{\tau_{b,max,exp}}\right)_i - \left(\frac{\tau_{b,max,theor}}{\tau_{b,max,exp}}\right)_m; S = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}}; n=16; v = S / \left(\frac{\tau_{b,max,theor}}{\tau_{b,max,exp}}\right)_m$$

Взаємодія факторів $f_{cm,prism}$ і l_b/\varnothing та l_b/\varnothing і ρ_{fv} на верхньому рівні варіювання порівняно з нульовим рівнем варіювання сумісно не впливають на $\tau_{b,max}$, оскільки коефіцієнти за цих взаємодій дорівнюють 0,1 і мають протилежні знаки.

На рис. 3.13 – 3.15 подано залежності відносних довжин закладання стрижнів у фібробетон призм від міцності бетону та вмісту фібрового армування за умови, що при максимальних витягувальних зусиллях у стрижнях досягається напруження 500 МПа як характеристичне значення міцності арматури.

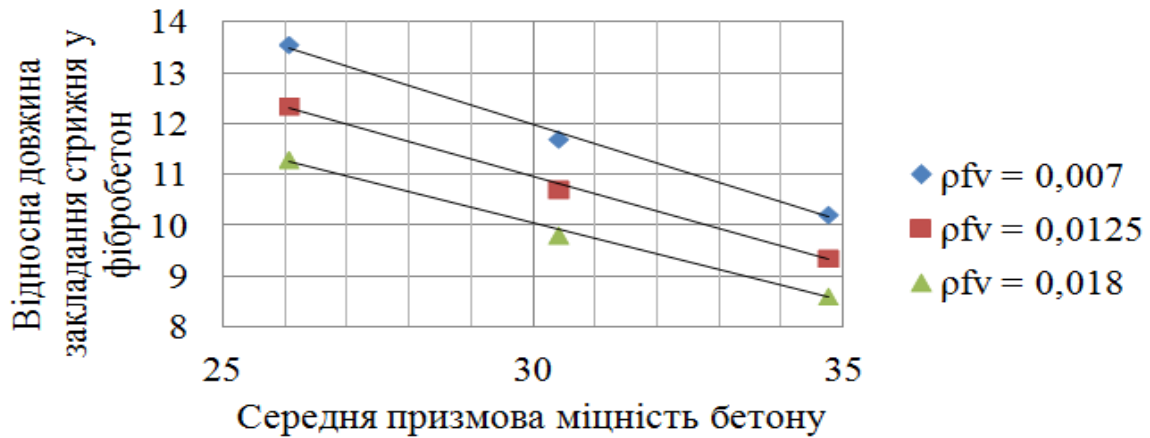


Рис. 3.13 – Залежність $\langle \frac{l_b}{\varnothing} - f_{cm,prism} \rangle$ при $\sigma_S = 500$ МПа в кінці зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 8 мм



Рис. 3.13 – Залежність $\langle \frac{l_b}{\varnothing} - f_{cm,prism} \rangle$ при $\sigma_S = 500$ МПа в кінці зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 10 мм

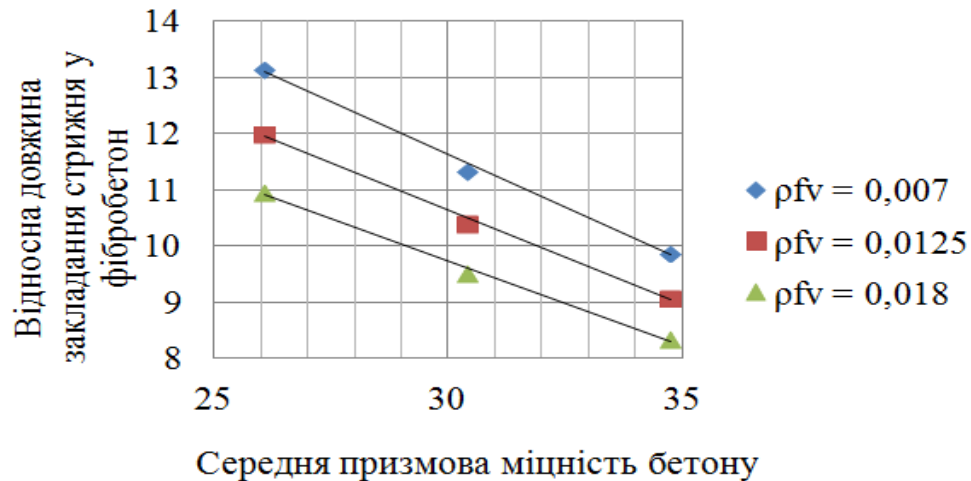


Рис. 3.13 – Залежність « $\frac{l_b}{\phi} - f_{cm,prism}$ » при $\sigma_S = 500$ МПа в кінці зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 12 мм

Як і на початку зсуву стрижнів, відносні довжини закладання стрижнів $\frac{l_b}{\phi}$ відрізняються несуттєво. $\frac{l_b}{\phi} = 8,63; 8,48; 8,63$ для стрижнів діаметром 8, 10 і 12 мм відповідно за бетону класу С30/35 і коефіцієнта фібрового армування $\rho_{fv} = 0,018$.

Таким чином, рівняння (3.23) і (3.24) можна використати для визначення $\sigma_{S,max}$ і $\tau_{b,max}$ відповідно, що дозволяє оцінювати запас міцності анкерування арматури за дії короткотривалих навантажень.

3.2.3. Математичні моделі для визначення напружень у стрижневій арматурі та напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном за зсуву незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм

Граничні напруження зчеплення стрижневої арматури f_b можна назвати умовними. Вони є меншими за максимальні, і їх найчастіше призначають такими, які визначають за зсуву незавантаженого кінця стрижня на 0,1 мм [8 – 14]. Свого часу О. О. Оатул також пропонував граничні нормальні напруження за витягування стрижнів визначати так, щоб зсув незавантаженого кінця стрижня не перевищував 0,1 мм [77; 78]. Це

обґрунтовували тим, що тривала дія навантаження за більших зсувів може спричинити повну втрату зчеплення арматури з бетоном.

Метою цих досліджень було вивчення впливу вмісту фібри в одиниці об'єму бетону, відносної довжини закладання стрижнів у бетон, міцності бетону і діаметра стрижнів на напруження у стрижневій арматурі $\sigma_{S,0,1\text{мм}}$ та напруження зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном f_b за зсуву незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм. Умови планування повного чотирифакторного експерименту (ПФЕ 2⁴) експерименту подано в таблиці 3.2, а матриця планування і експериментальні значення напружень в арматурі за зміщення незавантажених кінців стрижнів з фібробетонних призм на 0,1 мм $\sigma_{S,0,1\text{мм}}$.

Вільний член рівняння регресії визначали за формулою (3.2) і даними таблиці 3.23:

$$b_0 = \frac{\sum_1^N \bar{y}_u}{N} = \frac{6534,94}{16} = 408,43.$$

Далі визначали розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів рівняння регресії за лінійних членів і за взаємодій (таблиця 3.24).

Коефіцієнти рівняння регресії $b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ визначали за формулами (3.3) та (3.4) і даними таблиці 3.24:

$$b_1 = \frac{932,66}{16} = 58,29;$$

$$b_2 = \frac{1307}{16} = 81,69;$$

$$b_3 = \frac{618,16}{16} = 38,64;$$

$$b_4 = \frac{99,53}{16} = 6,22;$$

$$b_{12} = \frac{186,56}{16} = 11,66;$$

$$b_{13} = \frac{88,24}{16} = 5,52;$$

$$b_{14} = \frac{14,20}{16} = 0,8875;$$

$$b_{23} = \frac{123,66}{16} = 7,73;$$

$$b_{24} = \frac{19,90}{16} = 1,24;$$

$$b_{34} = \frac{9,42}{16} = 0,59.$$

Для визначення значущості цих коефіцієнтів визначаємо дисперсію відтворюваності за рядками матриці (таблиця 3.25).

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{(y)}^2$ знаходили за формулою (3.5):

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - y_m)^2}{N(r-1)} = \frac{382,1478}{16(3-1)} = 11,94,$$

Середньоквадратичне відхилення визначаємо за формулою (3.6):

$$S_{(y)} = \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{11,94} = 3,46.$$

Середньоквадратична помилка (формула (3.7)):

$$S_{(b_0)} = S_{(b_i)} = S_{(b_{ij})} = \frac{S_{(y)}}{\sqrt{N}} = \frac{3,46}{\sqrt{16}} = 0,86.$$

Табличне значення t -критерію Стьюдента за рівня значущості $\alpha = 0,005$ ($P = 95\%$) дорівнює 2,04, що відповідає числу ступенів свободи $f_y = N(r - 1) = 16(3 - 1) = 32$.

З таблиці 3.24 вибираємо найменші значення коефіцієнтів і знаходимо розрахункові значення t_p :

$$t_p = \frac{|b_{34}|}{S_{(b_{34})}} = \frac{0,59}{0,86} = 0,69 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{14}|}{S_{(b_{14})}} = \frac{0,89}{0,86} = 1,03 < t = 2,04.$$

$$t_p = \frac{|b_{24}|}{S_{(b_{24})}} = \frac{1,24}{0,86} = 1,44 < t = 2,04.$$

Отже, коефіцієнти b_{14} , b_{24} , b_{34} є незначущими.

Рівняння регресії у кодованому виді має вигляд:

$$Y = 408,43 + 58,29X_1 + 81,69X_2 + 38,64X_3 + 6,22X_4 + 11,66X_1X_2 + 5,52X_1X_3 + 7,73X_2X_3. \quad (3.27)$$

Таблиця 3.23 – Матриця планування і експериментальні значення напружень в арматурі $\sigma_{S,0,1}$ за зсуву незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм

Марки зразків	Точка плану	Фактори				Напруження в арматурі за зсуву 0,1мм $\sigma_{S,0,1}$, МПа			Середнє значення напружень в арматурі за зсуву 0,1 мм $\sigma_{S,0,1}$, МПа
		X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	
3.3PF12.144	1	+1	+1	+1	+1	627,11	618,38	621,68	622,39
3.3PF8.96	2	+1	+1	+1	-1	601,59	602,85	606,72	603,72
3.1PF12.144	3	+1	+1	-1	+1	516,55	516,64	511,24	514,81
3.1PF8.96	4	+1	+1	-1	-1	496,97	503,95	497,19	499,37
3.3PF12.96	5	+1	-1	+1	+1	414,76	411,94	418,06	414,92
3.3PF8.64	6	+1	-1	+1	-1	403,65	404,43	399,33	402,47
3.1PF12.96	7	+1	-1	-1	+1	344,66	337,08	347,89	343,21
3.1PF8.64	8	+1	-1	-1	-1	335,73	332,29	330,71	332,91
1.3PF12.144	9	-1	+1	+1	+1	468,75	462,28	469,73	466,92
1.3PF8.96	10	-1	+1	+1	-1	454,16	451,13	453,44	452,91
1.1PF12.144	11	-1	+1	-1	+1	386,5	382,24	389,92	386,22
1.1PF8.96	12	-1	+1	-1	-1	375,09	377,44	371,36	374,63
1.3PF12.96	13	-1	-1	+1	+1	315,75	309,85	308,24	311,28
1.3PF8.64	14	-1	-1	+1	-1	300,16	305,01	300,65	301,94
1.1PF12.96	15	-1	-1	-1	+1	256,48	254,03	261,93	257,48
1.1PF8.64	16	-1	-1	-1	-1	249,04	248,61	251,63	249,76
Сума									6534,94
									$b_0 = 408,43$
Результати подано як середні для трьох зразків-близнюків									

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення Y для кожного рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (таблиця 3.26).

Дисперсія адекватності:

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{r(\sum_{r=1}^{N_i} (y_i - y_m)^2)}{N_1 - m} = \frac{3 \cdot 66,8361}{16 - 8} = 25,06.$$

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_p = \frac{S_{\hat{a}\hat{a}}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{25,06}{11,94} = 2,099.$$

Таблиця 3.24 – Коефіцієнти рівняння регресії функції $\sigma_{S,0,1}$

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів									
за лінійних членів				за взаємодій					
$\bar{y}\bar{o}_1$	$\bar{y}\bar{o}_2$	$\bar{y}\bar{o}_3$	$\bar{y}\bar{o}_4$	$\bar{y}\bar{o}_1 \bar{o}_2$	$\bar{y}\bar{o}_1 \bar{o}_3$	$\bar{y}\bar{o}_1 \bar{o}_4$	$\bar{y}\bar{o}_2 \bar{o}_3$	$\bar{y}\bar{o}_2 \bar{o}_4$	$\bar{y}\bar{o}_3 \bar{o}_4$
+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39	+622,39
+603,72	+603,72	+603,72	-603,72	+603,72	+603,72	-603,72	+603,72	-603,72	-603,72
+514,81	+514,81	-514,81	+514,81	+514,81	-514,81	+514,81	-514,81	+514,81	-514,81
+499,37	+499,37	-499,37	-499,37	+499,37	-499,37	-499,37	-499,37	+499,37	+499,37
+414,92	-414,92	+414,92	+414,92	-414,92	+414,92	-414,92	-414,92	-414,92	+414,92
+402,47	-402,47	+402,47	-402,47	-402,47	+402,47	-402,47	-402,47	+402,47	-402,47
+343,21	-343,21	-343,21	+343,21	-343,21	-343,21	+343,21	+343,21	-343,21	-343,21
+332,91	-332,91	-332,91	-332,91	-332,91	-332,91	-332,91	+332,91	+332,91	+332,91
-466,92	+466,92	+466,92	+466,92	-466,92	-466,92	-466,92	+466,92	+466,92	+466,92
-452,91	+452,91	+452,91	-452,91	-452,91	-452,91	+452,91	-452,91	-452,91	-452,91
-386,22	+386,22	-386,22	+386,22	-386,22	+386,22	-386,22	-386,22	+386,22	-386,22
-374,63	+374,63	-374,63	-374,63	-374,63	+374,63	+374,63	-374,63	-374,63	+374,63
-311,28	-311,28	+311,28	+311,28	+311,28	-311,28	-311,28	-311,28	-311,28	+311,28
-301,94	-301,94	+301,94	-301,94	+301,94	-301,94	+301,94	-301,94	+301,94	-301,94
-257,48	-257,48	-257,48	+257,48	+257,48	+257,48	-257,48	+257,48	-257,48	-257,48
-249,76	-249,76	-249,76	-249,76	+249,76	+249,76	+249,76	+249,76	+249,76	+249,76
$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$	$\Sigma=$
+932,66	+1307	+618,16	+99,53	+186,56	+88,24	+14,20	+123,66	+19,90	+9,42
$b_1=$	$b_2=$	$b_3=$	$b_4=$	$b_{12}=$	$b_{13}=$	$b_{14}=$	$b_{23}=$	$b_{24}=$	$b_{34}=$
58,29	81,69	38,64	6,22	11,66	5,52	14,20	7,73	1,24	0,59

Табличне значення критерію Фішера F_T за $f_1 = 16(3 - 1) = 32$ і $f_2 = 16 - 8 = 8$ за інтерполяцією дорівнює 3,11. Отже, $F_p < F_T$, тому рівняння регресії є адекватним.

Таким чином, отримуємо рівняння для визначення напружень у завантажуваних кінцях стрижнів $\sigma_{S,0,1}$ за зсувів незавантажених кінців 0,1 мм у натуральному вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_{S,0,1} = & 408,43 + 58,29 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 81,69 \frac{l_b/\phi-10}{2} + 38,64 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + \\ & 6,22 \frac{\phi-10}{2} + 11,66 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_b/\phi-10}{2} \right) + \\ & 5,52 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) + 7,73 \left(\frac{l_b/\phi-10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right). \end{aligned} \quad (3.28)$$

Таблиця 3.25 – Розрахунок дисперсії відтворюваності функції $\sigma_{S,0,1}$ за рядками матриці

Точки плану	$(y_1 - y_m)^2$	$(y_2 - y_m)^2$	$(y_3 - y_m)^2$	$\sum S_{(y)}^2$
1	22,2784	16,0801	0,5041	38,8626
2	4,5369	0,7569	9	14,2938
3	3,0276	3,3489	12,7449	19,1214
4	5,76	20,9764	4,7524	31,4888
5	0,0256	8,8804	9,8596	18,7656
6	1,3924	3,8416	9,8596	15,0936
7	2,1025	37,5769	21,9024	61,5818
8	7,9524	0,3844	4,84	13,1768
9	3,3489	21,5296	7,8961	32,7746
10	1,5625	3,1684	0,2809	5,0118
11	0,0784	15,8404	13,69	29,6088
12	0,2116	7,8961	10,6929	18,8006
13	19,9809	2,0449	9,2416	31,2674
14	3,1684	9,4249	1,6641	14,2574
15	1	11,9025	19,8025	32,705
16	0,5184	1,3225	3,4969	5,3378
Сума				382,1478

Статистичний аналіз відношень теоретичних значень $\sigma_{S,0,1}$ до середніх експериментальних засвідчив, що середньоквадратичне відхилення $S = 0,005775$, а коефіцієнт варіації $v = 0,6\%$ (таблиця 3.27).

Таким чином, за витягування стрижнів зі зразків 3.3PF12.144, 3.3PF8.96, 3.1PF12.144 напруження $\sigma_{S,0,1}$ перевищують характеристичне значення міцності арматури класу А500С, а в зразках 3.1PF8.96 ці напруження в середньому дорівнюють 499,37 МПа. За витягування стрижнів зі зразків 1.3PF8.96, 1.3PF12.144 напруження $\sigma_{S,0,1\text{мм}}$ перевищували розрахункове значення міцності арматури, яке дорівнює 435 МПа.

Отже, якщо довжина закладання стрижнів дорівнює $12\emptyset$, розрахункового значення міцності арматури за витягування досягається для класу бетону зразків С30/35, якщо він армований фіброю з коефіцієнтом армування по об'єму $\rho_{fv} = 0,007$ чи 0,018. Однак за витягування стрижнів із бетону класу С20/25 за довжини закладання стрижнів, що дорівнює $12\emptyset$,

коефіцієнт фібрового армування по об'єму 0,007 є замалим, щоб напруження $\sigma_{s,0,1}$ сягали розрахункового значення міцності арматури. Аналіз рівняння (3.23) свідчить про те, що на нульовому рівні варіювання (бетон класу С25/30, коефіцієнт $\rho_{fv} = 0,0125$, довжина закладання стрижнів – $10\emptyset$, діаметр стрижня $\emptyset = 10$ мм) напруження $\sigma_{s,0,1} = 408,43$ МПа.

Для того, щоб ці напруження сягли розрахункового значення міцності, достатньо, щоб хоча б одне зі значень $f_{cm,prism}$, l_b/\emptyset чи ρ_{fv} відповідало верхньому рівню варіювання. Вплив діаметра стрижнів через несуттєву різницю індексів Рема є малим. Наприклад, за інших рівних умов збільшення діаметра з 10 мм до 12 мм підвищить напруження $\sigma_{s,0,1}$ лише на 6,22 МПа.

Умови планування експерименту для отримання математичної моделі граничних напружень зчеплення стрижневої арматури з фібробетоном f_b подано в таблиці 3.28.

Середні граничні напруження зчеплення стрижнів з фібробетоном f_b знаходили з умови рівності зовнішнього витягувального зусилля і зусилля зчеплення за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм. Отже, граничні напруження зчеплення стрижнів із фібробетоном f_b є меншими за максимальні дотичні напруження $\tau_{s,max}$. Матрицю планування експерименту подано в таблиці 3.27. Вільний член рівняння регресії визначали за формулою (3.2) і даними таблиці 3.28:

$$b_0 = \frac{\sum_1^N \bar{y}_u}{N} = \frac{163,21}{16} = 10,20.$$

Коефіцієнти рівняння регресії $b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ визначали за формулами (3.3) та (3.4) і даними таблиці 3.29:

$$b_1 = \frac{23,27}{16} = 1,45; b_2 = \frac{0,13}{16} = 0,008; b_3 = \frac{15,47}{16} = 0,97; b_4 = \frac{2,51}{16} = 0,16; b_{12} = \frac{0,03}{16} = 0,002; b_{13} = \frac{2,21}{16} = 0,14; b_{14} = \frac{0,33}{16} = 0,02; b_{23} = \frac{0,03}{16} = 0,0021;$$

$$b_{24} = \frac{-0,05}{16} = -0,003; b_{34} = \frac{0,21}{16} = 0,01.$$

Таблиця 3.26 – Розрахунок дисперсії адекватності для функції $\sigma_{S,0,1\text{мм}}$

Точки плану	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	Y	Y _m	Y-Y _m	(Y-Y _m) ²
1	408,43	+58,29	+81,69	+38,64	+6,22	+11,66	+5,52	0	+7,73	0	0	618,18	622,39	-4,21	17,7241
2	408,43	+58,29	+81,69	+38,64	-6,22	+11,66	+5,52	0	+7,73	0	0	605,74	603,72	2,02	4,0804
3	408,43	+58,29	+81,69	-38,64	+6,22	+11,66	-5,52	0	-7,73	0	0	514,4	514,81	-0,41	0,1681
4	408,43	+58,29	+81,69	-38,64	-6,22	+11,66	-5,52	0	-7,73	0	0	501,96	499,37	2,59	6,7081
5	408,43	+58,29	-81,69	+38,64	+6,22	-11,66	+5,52	0	-7,73	0	0	416,02	414,92	1,1	1,21
6	408,43	+58,29	-81,69	+38,64	-6,22	-11,66	+5,52	0	-7,73	0	0	403,58	402,47	1,11	1,2321
7	408,43	+58,29	-81,69	-38,64	+6,22	-11,66	-5,52	0	+7,73	0	0	343,16	343,21	-0,05	0,0025
8	408,43	+58,29	-81,69	-38,64	-6,22	-11,66	-5,52	0	+7,73	0	0	330,72	332,91	-2,19	4,7961
9	408,43	-58,29	+81,69	+38,64	+6,22	-11,66	-5,52	0	+7,73	0	0	467,24	466,92	0,32	0,1024
10	408,43	-58,29	+81,69	+38,64	-6,22	-11,66	-5,52	0	+7,73	0	0	454,8	452,91	1,89	3,5721
11	408,43	-58,29	+81,69	-38,64	+6,22	-11,66	+5,52	0	-7,73	0	0	385,54	386,22	-0,68	0,4624
12	408,43	-58,29	+81,69	-38,64	-6,57	-11,66	+5,52	0	-7,73	0	0	372,75	374,63	-1,88	3,5344
13	408,43	-58,29	-81,69	+38,64	+6,57	+11,66	-5,52	0	-7,73	0	0	312,07	311,28	0,79	0,6241
14	408,43	-58,29	-81,69	+38,64	-6,57	+11,66	-5,52	0	-7,73	0	0	298,93	301,94	-3,01	9,0601
15	408,43	-58,29	-81,69	-38,64	+6,22	+11,66	+5,52	0	+7,73	0	0	260,94	257,48	3,46	11,9716
16	408,43	-58,29	-81,69	-38,64	-6,22	+11,66	+5,52	0	+7,73	0	0	248,5	249,76	-1,26	1,5876
Сума															66,8361

Таблиця 3.27 – До визначення коефіцієнта варіації v відношення теоретичних значень $\sigma_{S,01MM,theor}$ до середніх експериментальних

Марки зразків	$\sigma_{S,01MM,theor}$, МПа	$\sigma_{S,01MM,exp}$, МПа	$\frac{\sigma_{S,01MM,theor}}{\sigma_{S,01MM,exp}}$	$\sigma_{S,01MM,exp}$	Δ	Δ^2	S	v
				$\left(\frac{\sigma_{S,01MM,theor}}{\sigma_{S,01MM,exp}}\right)_m$				
3.3PF12.144	618,18	622,39	0,993236	0,999919	0,006683	4,46611E-05	0,005775	0,005776
3.3PF8.96	605,74	603,72	1,003346		-0,00343	1,17462E-05		
3.1PF12.144	514,4	514,81	0,999204		0,000715	5,11311E-07		
3.1PF8.96	501,96	499,37	1,005187		-0,00527	2,77506E-05		
3.3PF12.96	416,02	414,92	1,002651		-0,00273	7,46636E-06		
3.3PF8.64	403,58	402,47	1,002758		-0,00284	8,06174E-06		
3.1PF12.96	343,16	343,21	0,999854		6,43E-05	4,13875E-09		
3.1PF8.64	330,72	332,91	0,993422		0,006497	4,22111E-05		
1.3PF12.144	467,24	466,92	1,000685		-0,00077	5,87817E-07		
1.3PF8.96	454,8	452,91	1,004173		-0,00425	1,80996E-05		
1.1PF12.144	385,54	386,22	0,998239		0,001679	2,82006E-06		
1.1PF8.96	372,75	374,63	0,994982		0,004937	2,43733E-05		
1.3PF12.96	312,07	311,28	1,002538		-0,00262	6,86051E-06		
1.3PF8.64	298,93	301,94	0,990031		0,009888	9,7763E-05		
1.1PF12.96	260,94	257,48	1,013438		-0,01352	0,000182771		
1.1PF8.64	248,5	249,76	0,994955		0,004963	2,46363E-05		

$$\Delta_i = \left(\frac{\sigma_{S,01MM,theor}}{\sigma_{S,01MM,exp}}\right)_m - \left(\frac{\sigma_{S,01MM,theor}}{\sigma_{S,01MM,exp}}\right)_i; S = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}}; n=16; v = S / \left(\frac{\sigma_{S,01MM,theor}}{\sigma_{S,01MM,exp}}\right)_m$$

Дисперсію відтворюваності вихідного параметра $S_{\{y\}}^2$ знаходили за даними таблиці 3.30 і формулою (3.5):

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N(r-1)} = \frac{0,27184}{16(3-1)} = 0,00850.$$

Таблиця 3.28 – Матриця планування і експериментальні значення граничних напружень зчеплення f_b за зсуву незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм

Точка плану	Фактори				Граничні напруження зчеплення f_b , МПа			Середнє значення граничних напружень зчеплення $f_{b,m}$, МПа
	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	
1	+1	+1	+1	+1	13,06	12,88	12,95	12,96
2	+1	+1	+1	-1	12,53	12,56	12,64	12,58
3	+1	+1	-1	+1	10,76	10,76	10,65	10,72
4	+1	+1	-1	-1	10,35	10,5	10,36	10,40
5	+1	-1	+1	+1	12,92	12,85	13,06	12,95
6	+1	-1	+1	-1	12,59	12,62	12,45	12,55
7	+1	-1	-1	+1	10,75	10,51	10,84	10,70
8	+1	-1	-1	-1	10,47	10,35	10,32	10,38
9	-1	+1	+1	+1	9,77	9,63	9,786	9,73
10	-1	+1	+1	-1	9,46	9,4	9,45	9,44
11	-1	+1	-1	+1	8,05	7,96	8,12	8,04
12	-1	+1	-1	-1	7,81	7,86	7,74	7,80
13	-1	-1	+1	+1	9,85	9,66	9,63	9,71
14	-1	-1	+1	-1	9,36	9,51	9,38	9,42
15	-1	-1	-1	+1	8,02	7,94	8,19	8,05
16	-1	-1	-1	-1	7,76	7,75	7,84	7,78
Сума								163,21
								$b_0 = 10,20$

Середньоквадратичне відхилення визначаємо за формулою (3.6):

$$S_{\{y\}} = \sqrt{S_{\{y\}}^2} = \sqrt{0,00850} = 0,0922.$$

Середньоквадратична помилка (формула (3.7)):

$$S_{\{b_0\}} = S_{\{b_i\}} = S_{\{b_{ij}\}} = \frac{S_{\{y\}} - 0,0922}{\sqrt{N}} = \frac{0,0922}{\sqrt{16}} = 0,0231.$$

Табличне значення t -критерію Стьюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$ ($P = 95\%$) дорівнює 2,04, що відповідає числу ступенів свободи $f_y = N(r - 1) = 16(3 - 1) = 32$.

Таблиця 3.29 – Коефіцієнти рівняння регресії функції f_b

Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів									
за лінійних членів				за взаємодій					
$\bar{y}\bar{d}_1$	$\bar{y}\bar{d}_2$	$\bar{y}\bar{d}_3$	$\bar{y}\bar{d}_4$	$\bar{y}\bar{d}_1\bar{d}_2$	$\bar{y}\bar{d}_1\bar{d}_3$	$\bar{y}\bar{d}_1\bar{d}_4$	$\bar{y}\bar{d}_2\bar{d}_3$	$\bar{y}\bar{d}_2\bar{d}_4$	$\bar{y}\bar{d}_3\bar{d}_4$
+12,96	+12,96	+12,96	+12,96	+12,96	+12,96	+12,96	+12,96	+12,96	+12,96
+12,58	+12,58	+12,58	-12,58	+12,58	+12,58	-12,58	+12,58	-12,58	-12,58
+10,72	+10,72	-10,72	+10,72	+10,72	-10,72	+10,72	-10,72	+10,72	-10,72
+10,40	+10,40	-10,40	-10,40	+10,40	-10,40	-10,40	-10,40	-10,40	+10,40
+12,95	-12,95	+12,95	+12,95	-12,95	+12,95	+12,95	-12,95	-12,95	+12,95
+12,55	-12,55	+12,55	-12,55	-12,55	+12,55	-12,55	-12,55	+12,55	-12,55
+10,70	-10,70	-10,70	+10,70	-10,70	-10,70	+10,70	+10,70	-10,70	-10,70
+10,38	-10,38	-10,38	-10,38	-10,38	-10,38	-10,38	+10,38	+10,38	+10,38
-9,73	+9,73	+9,73	+9,73	-9,73	-9,73	-9,73	+9,73	+9,73	+9,73
-9,44	+9,44	+9,44	-9,44	-9,44	-9,44	+9,44	+9,44	-9,44	-9,44
-8,04	+8,04	-8,04	+8,04	-8,04	+8,04	-8,04	-8,04	+8,04	-8,04
-7,80	+7,80	-7,80	-7,80	-7,80	+7,80	+7,80	-7,80	-7,80	+7,80
-9,71	-9,71	+9,71	+9,71	+9,71	-9,71	-9,71	-9,71	-9,71	+9,71
-9,42	-9,42	+9,42	-9,42	+9,42	-9,42	+9,42	-9,42	+9,42	-9,42
-8,05	-8,05	-8,05	+8,05	+8,05	+8,05	-8,05	+8,05	-8,05	-8,05
-7,78	-7,78	-7,78	-7,78	+7,78	+7,78	+7,78	+7,78	+7,78	+7,78
$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$
+23,27	+0,13	+15,47	+2,51	+0,03	+2,21	+0,33	+0,03	-0,05	+0,21
$b_1 =$	$b_2 =$	$b_3 =$	$b_4 =$	$b_{12} =$	$b_{13} =$	$b_{14} =$	$b_{23} =$	$b_{24} =$	$b_{34} =$
+1,45	+0,008	+0,97	+0,16	+0,002	+0,14	+0,02	+0,002	-0,003	+0,01

З таблиці 3.29 вибираємо значення коефіцієнтів рівняння регресії і знаходимо розрахункові значення t_p за формулою (3.10):

$$t_p = \frac{|b_1|}{S_{\{b_1\}}} = \frac{1,45}{0,0231} = 62,77 > t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_2|}{S_{\{b_2\}}} = \frac{0,008}{0,0231} = 0,35 < t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_3|}{S_{\{b_3\}}} = \frac{0,97}{0,0231} = 41,99 > t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_4|}{S_{\{b_4\}}} = \frac{0,16}{0,0231} = 6,93 > t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_{12}|}{S_{\{b_{12}\}}} = \frac{0,002}{0,0231} = 0,09 < t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_{13}|}{S_{\{b_{13}\}}} = \frac{0,14}{0,0231} = 6,06 > t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_{14}|}{S_{\{b_{14}\}}} = \frac{0,02}{0,0231} = 0,87 < t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_{23}|}{S_{\{b_{23}\}}} = \frac{0,002}{0,0231} = 0,09 < t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_{24}|}{S_{\{b_{24}\}}} = \frac{0,003}{0,0231} = 0,13 < t = 2,04;$$

$$t_p = \frac{|b_{34}|}{S_{\{b_{34}\}}} = \frac{0,01}{0,0231} = 0,43 < t = 2,04.$$

Таблиця 3.30 – Розрахунок дисперсії відтворюваності функції f_b за рядками матриці

Точки плану и	$(y_1 - \bar{y}_n)^2$	$(y_2 - \bar{y}_n)^2$	$(y_3 - \bar{y}_n)^2$	$\sum S_{\{y\}}^2$
1	0,01	0,0064	0,0001	0,0165
2	0,0025	0,0004	0,0036	0,0065
3	0,0016	0,0016	0,0049	0,0081
4	0,0025	0,01	0,0016	0,0141
5	0,0009	0,01	0,0121	0,023
6	0,0016	0,0049	0,01	0,0165
7	0,0025	0,0361	0,0196	0,0582
8	0,0081	0,0009	0,0036	0,0126
9	0,0016	0,01	0,00314	0,01474
10	0,0004	0,0016	1E-04	0,0021
11	0,0001	0,0064	0,0064	0,0129
12	1E-04	0,0036	0,0036	0,0073
13	0,0196	0,0025	0,0064	0,0285
14	0,0036	0,0081	0,0016	0,0133
15	0,0009	0,0121	0,0196	0,0326
16	0,0004	0,0009	0,0036	0,0049
Сума				0,27184

Отже, коефіцієнти $b_2, b_{12}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ є незначущими, і рівняння регресії у кодованому виді має вигляд:

$$\hat{y} = 10,2 + 1,45x_1 + 0,97x_3 + 0,16x_4 + 0,14x_1x_3. \quad (3.29)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо значення u для кожного рядка матриці і знаходимо суму квадратів відхилень розрахункових даних (таблиця 3.31).

Дисперсію адекватності визначаємо за формулою (3.12):

$$S_{\text{дд}}^2 = \frac{r(\sum_{r=1}^{N_i} (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2)}{N_1 - m} = \frac{3 \cdot 0,3745}{16 - 6} = 0,112.$$

Табличне значення критерію Фішера F_T при $f_1 = 16(3 - 1) = 32$ і $f_2 = 16 - 5 = 11$ за інтерполяцією дорівнює 2,21, а розрахункове $F_p = 0,28$. Отже, $F_p < F_T$, тому рівняння регресії є адекватним.

Статистичний аналіз відношень теоретичних значень f_b до середніх експериментальних засвідчив, що середньоквадратичне відхилення $S = 0,002911$, а коефіцієнт варіації $v = 0,3\%$ (таблиця 3.22).

Таким чином, рівняння для визначення граничних напружень зчеплення має такий натуральний вигляд:

$$f_b = 10,2 + 1,45 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 0,97 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 0,16 \frac{\phi - 10}{2} + 0,14 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right). \quad (3.30)$$

Аналіз формули (3.25) свідчить про те, що на граничні напруження зчеплення стрижневої арматури зі сталевібробетоном впливає насамперед призмova міцність бетону-матриці $f_{cm,prism}$. Наприклад, підвищення класу бетону з C25/30 до C30/35 збільшує f_b на 1,45 МПа. Збільшення коефіцієнта фібрового армування по об'єму з $\rho_{fv} = 0,0125$ до $\rho_{fv} = 0,018$ призведе до збільшення f_b на 0,97 МПа. Найменше на збільшення f_b впливає збільшення діаметра стрижнів, оскільки збільшення діаметра з 10 мм до 12 мм підвищує f_b лише на 0,16 МПа.

З формули (3.25) випливає, що граничні напруження зчеплення стрижневої арматури зі сталевібробетоном f_b не залежать від відносної довжини закладання стрижнів у сталевібробетон.

Порівнюючи формули (3.21) і (3.28), можна зробити висновок, що дотичні напруження між стрижнями і сталевібробетоном на початку зсувів

незавантажених кінців стрижнів і за зсуву 0,1 мм практично не залежить від відносної довжини закладання стрижнів у фібробетон. Однак, аналізуючи формулу (3.26), можна зробити висновок, що за максимальних витягувальних зусиль дотичні напруження між стрижнями і фібробетоном усе ж несуттєво залежать від відносної довжини закладання стрижнів у фібробетон.

На рис. 3.14 – 3.16 подано залежності « $\frac{l_b}{\varnothing} - f_{cm,prism}$ » при $\sigma_S = 500$ МПа за зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 8, 10 і 12 мм на 0,1 мм.

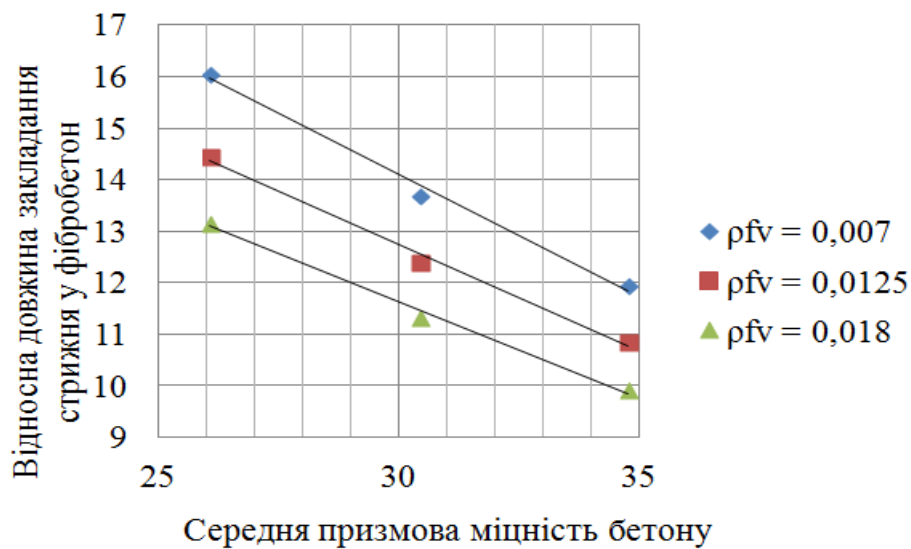


Рис. 3.14 – Залежність « $\frac{l_b}{\varnothing} - f_{cm,prism}$ » при $\sigma_S = 500$ МПа за зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 8 мм на 0,1 мм

Можна зауважити, що $\frac{l_b}{\varnothing}$ за $\sigma_S = 500$ МПа за зсувів незавантажених кінців стрижнів діаметром 8, 10 і 12 мм різняться несуттєво.

Таблиця 3.31 – Розрахунок дисперсії адекватності для функції f_b

Точки плану	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	\hat{y}_u	\bar{y}_u	$\hat{y}_u - \bar{y}_u$	$(\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2$
1	10,2	+1,45	0	+0,97	+0,16	0	+0,14	0	0	0	0	12,92	12,96	-0,04	0,0016
2	10,2	+1,45	0	+0,97	-0,16	0	+0,14	0	0	0	0	12,60	12,58	0,02	0,0004
3	10,2	+1,45	0	-0,97	+0,16	0	-0,14	0	0	0	0	10,70	10,72	-0,02	0,0004
4	10,2	+1,45	0	-0,97	-0,16	0	-0,14	0	0	0	0	10,38	10,40	-0,02	0,0004
5	10,2	+1,45	0	+0,97	+0,16	0	+0,14	0	0	0	0	12,92	12,95	-0,03	0,0009
6	10,2	+1,45	0	+0,97	-0,16	0	+0,14	0	0	0	0	12,6	12,55	0,05	0,0025
7	10,2	+1,45	0	-0,97	+0,16	0	-0,14	0	0	0	0	10,70	10,70	0	0
8	10,2	+1,45	0	-0,97	-0,16	0	-0,14	0	0	0	0	10,38	10,38	0	0
9	10,2	-1,45	0	+0,97	+0,16	0	-0,14	0	0	0	0	9,74	9,73	0,01	1E-04
10	10,2	-1,45	0	+0,97	-0,16	0	-0,14	0	0	0	0	9,42	9,44	-0,02	0,0004
11	10,2	-1,45	0	-0,97	+0,16	0	+0,14	0	0	0	0	8,08	8,04	0,04	0,0016
12	10,2	-1,45	0	-0,97	-0,16	0	+0,14	0	0	0	0	7,76	7,80	-0,04	0,0016
13	10,2	-1,45	0	+0,97	+0,16	0	-0,14	0	0	0	0	9,74	9,71	0,03	0,0009
14	10,2	-1,45	0	+0,97	-0,16	0	-0,14	0	0	0	0	9,42	9,42	0	0
15	10,2	-1,45	0	-0,97	+0,16	0	+0,14	0	0	0	0	8,08	8,05	0,03	0,0009
16	10,2	-1,45	0	-0,97	-0,16	0	+0,14	0	0	0	0	7,76	7,78	-0,02	0,0004
Сума															0,0121

Таблиця 3.32 – До визначення коефіцієнта варіації v відношення теоретичних значень $f_{b,theor}$ до середніх експериментальних $f_{b,exp}$

Марки зразків	$f_{b,theor}$, МПа	$f_{b,exp}$, МПа	$\frac{f_{b,theor}}{f_{b,exp}}$	$\left(\frac{f_{b,theor}}{f_{b,exp}}\right)_m$	Δ	Δ^2	S	v
3.3PF12.144	12,92	12,96	0,996914	0,999961	0,003048	9,28972E-06	0,002911	0,002911
3.3PF8.96	12,6	12,58	1,00159		-0,00163	2,65149E-06		
3.1PF12.144	10,7	10,72	0,998134		0,001827	3,3385E-06		
3.1PF8.96	10,38	10,4	0,998077		0,001885	3,55157E-06		
3.3PF12.96	12,92	12,95	0,997683		0,002278	5,18968E-06		
3.3PF8.64	12,6	12,55	1,003984		-0,00402	1,61811E-05		
3.1PF12.96	10,7	10,7	1		-3,9E-05	1,48343E-09		
3.1PF8.64	10,38	10,38	1		-3,9E-05	1,48343E-09		
1.3PF12.144	9,74	9,73	1,001028		-0,00107	1,13692E-06		
1.3PF8.96	9,42	9,44	0,997881		0,00208	4,32694E-06		
1.1PF12.144	8,08	8,04	1,004975		-0,00501	2,51366E-05		
1.1PF8.96	7,76	7,8	0,994872		0,00509	2,59049E-05		
1.3PF12.96	9,74	9,71	1,00309		-0,00313	9,7851E-06		
1.3PF8.64	9,42	9,42	1		-3,9E-05	1,48343E-09		
1.1PF12.96	8,08	8,05	1,003727		-0,00377	1,41769E-05		
1.1PF8.64	7,76	7,78	0,997429		0,002532	6,41193E-06		

$$\Delta_i = \left(\frac{f_{b,theor}}{f_{b,exp}}\right)_m - \left(\frac{f_{b,theor}}{f_{b,exp}}\right)_i; S = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}}; n=16; v = S / \left(\frac{f_{b,theor}}{f_{b,exp}}\right)_m$$

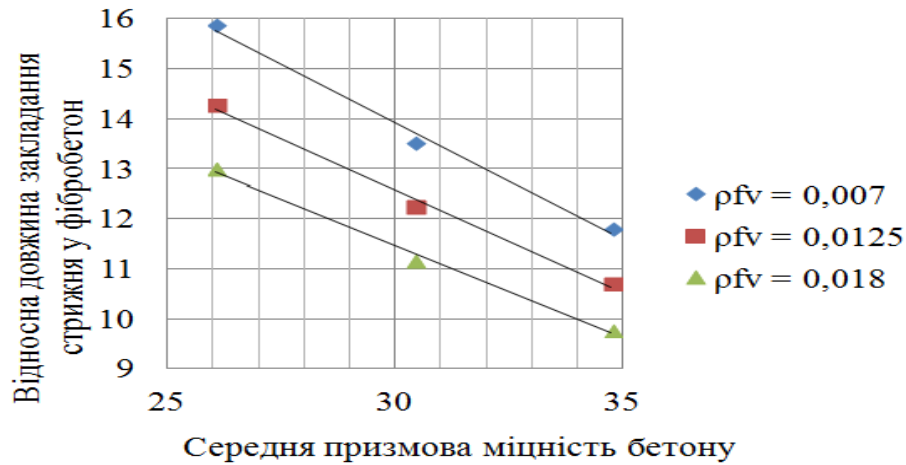


Рис. 3.15 – Залежність $\langle \frac{l_b}{\phi} - f_{cm,prism} \rangle$ при $\sigma_s = 500$ МПа за зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 10 мм на 0,1 мм

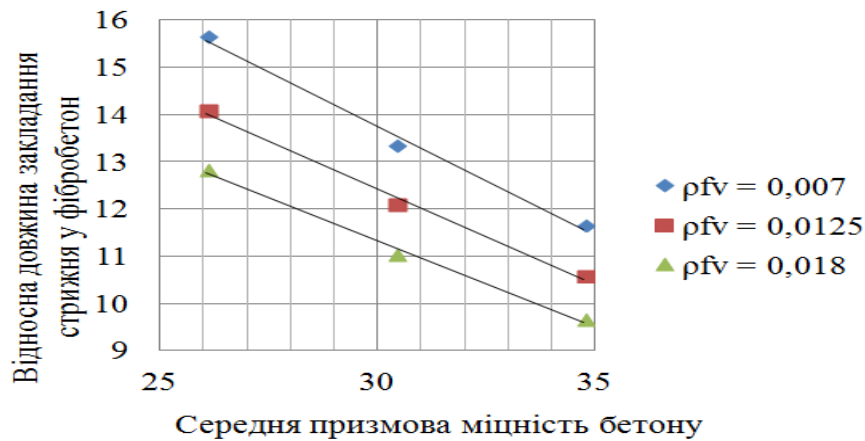


Рис. 3.16 – Залежність $\langle \frac{l_b}{\phi} - f_{cm,prism} \rangle$ при $\sigma_s = 500$ МПа за зсуву незавантажених кінців стрижнів діаметром 12 мм на 0,1 мм

Наприклад, за класу бетону С30/35 і коефіцієнті фібрового армування $\rho_{fv} = 0,018$ $\frac{l_b}{\phi} = 9,91; 9,78; 9,69$ для стрижнів діаметром 8, 10 і 12 мм відповідно. Отже, рівняння регресії (3.28) і (3.30) можна використати для визначення напружень у стрижнях і міцності їх зчеплення з фібробетоном, що дозволить обгрунтовано призначити базову і необхідну довжину анкетування стрижнів.

3.3 Висновки до розділу 3

Результати експериментальних досліджень анкерування стрижневої арматури у 93 зразках призмового типу, з яких 72 містили фіброве армування, свідчать про те, що:

1. Витягувальні зусилля на початкові зсуву незавантаженого кінця стрижня, за його зсуву 0,1 мм, максимальні витягувальні зусилля з фібробетону завжди були більшими порівняно з зусиллями за витягування з бетону. Зокрема, для фібробетонних зразків 2.2PF10.120 середнє значення витягувальних зусиль $N_{S0,1} = 36,30$ кН, а для бетонних зразків 2.0P10.120 $N_{S0,1} = 29,35$ кН.

2. Підвищення вмісту фібри в одиниці об'єму бетонної суміші сприяє збільшенню згаданих вище витягувальних зусиль. Наприклад, для зразків 3.3PF12.144 $N_{S0,1} = 70,35$ кН, а для зразків 3.1PF12.144 $N_{S0,1} = 58,19$ кН.

3. Збільшення міцності бетону-матриці фібробетонних зразків призводить до збільшення витягувальних зусиль. Наприклад, для зразків 3.3PF12.144 $N_{S0,1} = 70,35$ кН, а для зразків 1.3PF12.144 $N_{S0,1} = 52,78$ кН.

4. Відношення зусиль, за яких зсув незавантажених кінців стрижнів дорівнював 0,1 мм, до зусиль, за яких почалося зміщення, $\frac{N_{S0,1}}{N_{S0}} = 1,54 \dots 1,83$ (в середньому – 1,69). Відношення максимальних зусиль до зусиль, за яких зсув незавантажених кінців стрижнів дорівнював 0,1 мм. $\frac{N_{Smax}}{N_{S0,1}} = 1,09 \dots 1,23$ (в середньому – 1,16).

5. У дослідженнях використано математичне планування повного чотирифакторного експерименту (ПФЕ 2⁴), що дозволило отримати рівняння регресії для визначення напружень у стрижнях і дотичних напружень між стрижнями і фібробетоном на початкові зсуву, за максимальних витягувальних зусиль і за зсуву стрижнів 0,1 мм, що прийнято за умовний критерій втрати зчеплення. На всіх стадіях роботи стрижня за витягування найбільший вплив на напруження зчеплення має міцність бетону, а вже потім – вміст фібрової арматури і діаметр стрижнів.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [23-26].

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ А500С У ФІБРОБЕТОНІ ЗРАЗКІВ БАЛКОВОГО ТИПУ ТА ЇХ АНАЛІЗ

4.1. Розвиток зсувів незавантажених кінців стрижнів за витягування зі зразків балкового типу

На кожному ступені навантаження зразків балкового типу вимірювали зміщення незавантажених кінців стрижнів відносно торців балок. У таблиці 4.1 подано середні значення зусиль на початкові зсуву N_{S0} , за зсуву 0,1 мм $N_{S0,1}$ і максимальні зусилля N_{max} для двох зразків-близнюків.

Під час випробування зразків балкового типу за значеннями зовнішніх згинальних моментів отримували витягувальне зусилля, прикладене до арматури, нормальні напруження в стрижнях, дотичні напруження між стрижнем і фібробетоном чи бетоном балок. Витягувальні зусилля на початкові зміщення N_0 , зусилля за зміщення незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм $N_{0,1}$ і максимальне витягувальне зусилля N_{max} подано в таблиці 4.1, а залежності зміщення незавантажених кінців стрижнів від витягувальних зусиль – на рис. 4.1 – 4.8.

За закладання стрижнів діаметром 10 мм на довжину 100 мм (10Ø) у бетон класу C20/25 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 26,07$ МПа, армований сталевую фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (балки 1.2BF10.100), зміщення розпочалося за середнього значення зусилля $N_{S0} = 13,53$ кН (рис. 4.1). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 23,01$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 27,07$ кН. Вказані зусилля для балкових зразків 1.2B10.100, які не містили фібри, дорівнювали 10,93 кН, 20,00 кН і 21,87 кН відповідно. За дії максимальних витягувальних зусиль N_{Smax} зміщення стрижнів для балок 1.2BF10.100 у середньому дорівнювало 1,42 мм, а для балок 1.2B10.100 – 1,23 мм.

У балкових зразках 2.1BF10.100, які містили стрижні діаметром 10 мм, закладені у фібробетон на довжину 100 мм, виконані з бетону класу C25/30 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, армованого фіброю ($\rho_{fv} = 0,007$) зміщення незавантажених кінців стрижнів розпочалося за зусилля $N_{S0} = 14,42$ кН (рис. 4.2). За зміщення стрижнів 0,1 мм зусилля $N_{S0,1} = 24,51$ кН, а $N_{Smax} = 28,63$ кН. У балках 2.0 B10.100, як не містили фібри ці зусилля дорівнювали 12,77 кН, 21,44 кН і 25,23 кН відповідно. За дії максимальних витягувальних зусиль N_{Smax} зміщення стрижнів для балок 2.1BF10.100у середньому дорівнювало 1,31 мм, а для балок 2.0 B10.100 – 1,26 мм.

Таблиця 4.1 – Витягувальні зусилля на початкові зміщення незавантаженого кінця стрижня N_0 , за зміщення 0,1 мм $N_{0,1}$ і максимальне витягувальне зусилля N_{max} у зразках балкового типу

Марки балкових зразків	N_0 , кН	$N_{0,1}$, кН	N_{max} , кН	$\frac{N_{0,1}}{N_0}$	$\frac{N_{max}}{N_{0,1}}$
1.2BF10.100	13,53	23,01	27,07	1,70	1,18
2.1BF10.100	14,42	24,51	28,63	1,70	1,17
2.2BF8.80	9,94	17,10	18,87	1,72	1,10
2.2BF10.80	13,26	24,32	27,06	1,83	1,11
2.2BF10.120	18,97	29,27	36,04	1,54	1,23
2.2BF12.120	22,36	38,02	44,72	1,70	1,18
2.3BF10.100	17,83	29,67	34,25	1,66	1,15
3.2BF10.100	18,54	30,10	35,53	1,62	1,18
1.0B10.100	10,93	20,00	21,87	1,83	1,09
2.0B10.100	12,77	21,44	25,23	1,68	1,18
2.0B8.80	7,62	12,25	14,42	1,61	1,18
2.0B10.80	10,28	17,38	20,44	1,69	1,18
2.0B10.120	14,62	23,67	27,85	1,62	1,18
2.0B12.120	15,56	28,18	33,16	1,81	1,18
2.0B10.100	12,77	21,44	25,23	1,68	1,18
3.0B10.100	14,65	24,29	28,90	1,66	1,19
Результати подано для двох зразків-близнюків кожної з марок зразків					

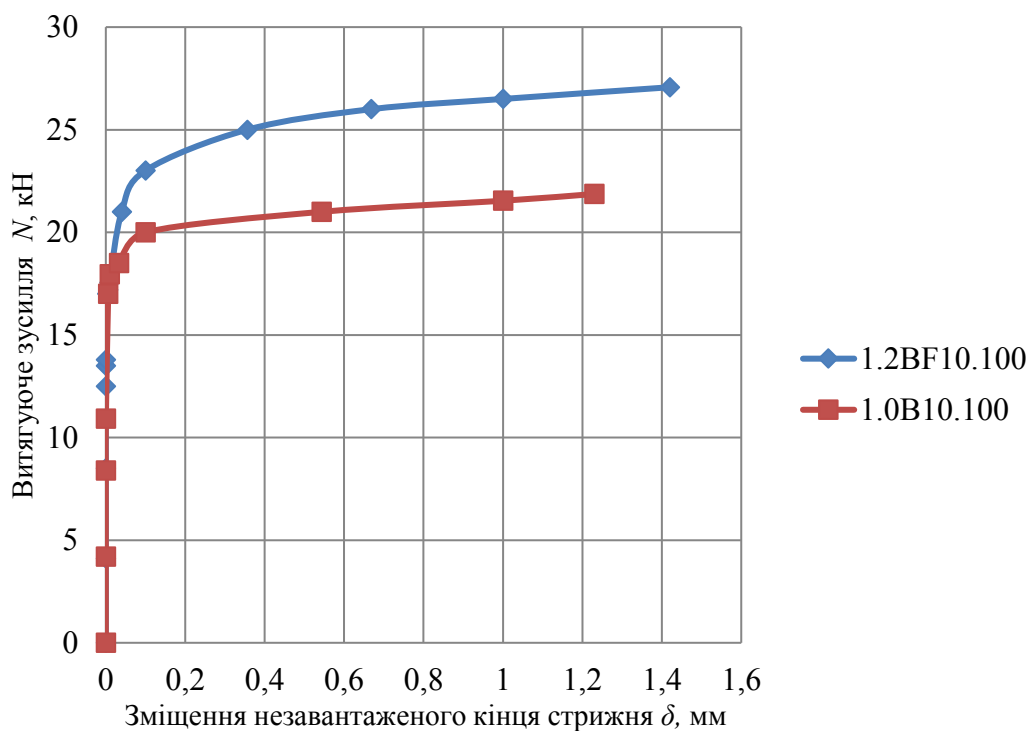


Рис. 4.1 – Залежність зміщення незавантажених кінців стрижнів від витягувальних зусиль у балках 1.2BF10.100 і 1.0B10.100

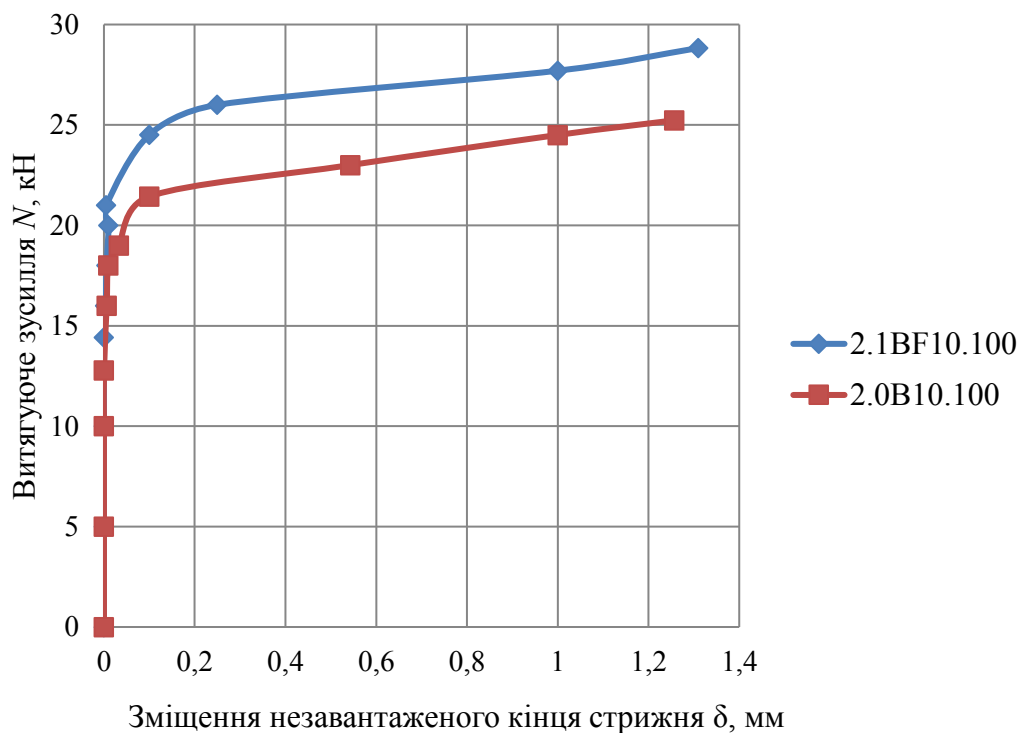


Рис. 4.2 – Залежність зміщення незавантажених кінців стрижнів від витягувальних зусиль у балках 2.1BF10.100 і 2.0B10.100

За закладання стрижнів діаметром 8 мм на довжину 80 мм (10Ø) у бетон класу С25/30 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа армований сталеву фібрую з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (балки 2.2BF8.80), зміщення розпочалося за середнього значення зусилля $N_{S0} = 9,94$ кН (рис. 4.3). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 17,10$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 18,87$ кН. Вказані зусилля для балкових зразків 2.0B8.80, які не містили фібри, дорівнювали 7,62 кН, 12,25 кН і 14,42 кН відповідно. За дії максимальних витягувальних зусиль N_{Smax} зміщення стрижнів для балок 2.2BF8.80 у середньому дорівнювало 1,38 мм, а для балок 2.0B8.80 – 1,23 мм.

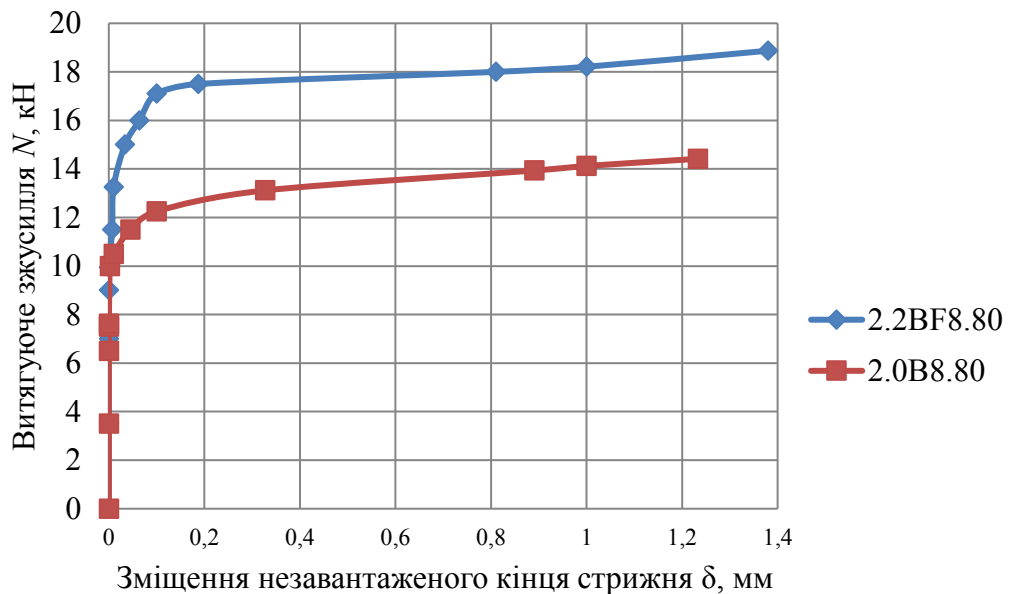


Рис. 4.3 – Залежність зміщення незавантажених кінців стрижнів від витягувальних зусиль у балках 2.2BF8.80 і 2.0B8.80

У балкових зразках 2.2BF10.80, які містили стрижні діаметром 10 мм, закладені у фібробетон на довжину 80 мм, виконані з бетону класу С25/30 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, армованого фібрую ($\rho_{fv} = 0,0125$) зміщення незавантажених кінців стрижнів розпочалося за зусилля $N_{S0} = 13,26$ кН (рис. 4.4). За зміщення стрижнів 0,1 мм зусилля $N_{S0,1} =$

24,32 кН, а $N_{Smax} = 27,06$ кН. У балках 2.0 В10.80, які не містили фібри, ці зусилля дорівнювали 10,28 кН, 17,38 кН і 20,44 кН відповідно. За дії максимальних витягувальних зусиль N_{Smax} зміщення стрижнів для балок 2.2BF10.80 у середньому дорівнювало 1,35 мм, а для балок 2.0 В10.80 – 1,27 мм.

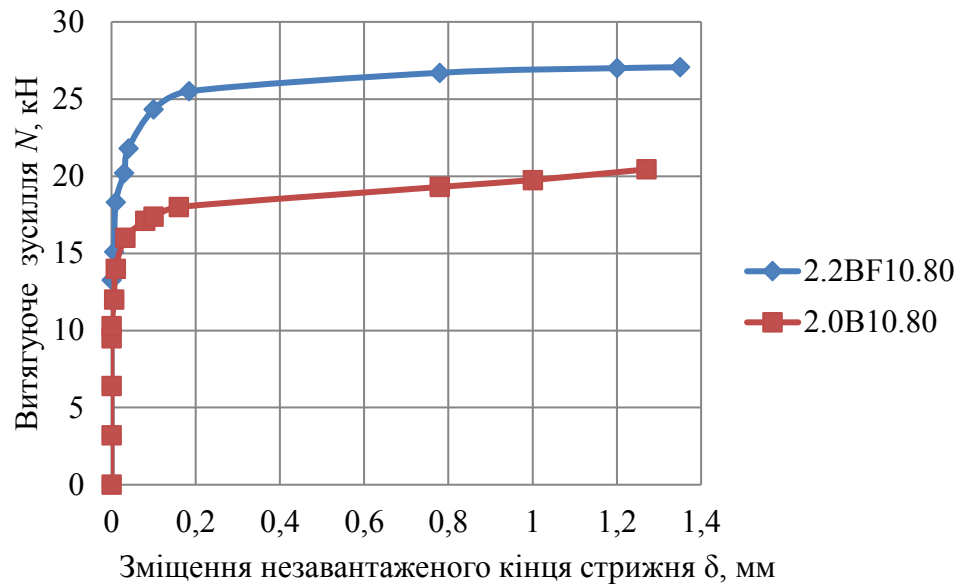


Рис. 4.4 – Залежність зміщення незавантажених кінців стрижнів від витягувальних зусиль у балках 2.2BF10.80 і 2.0 В10.80

За закладання стрижнів діаметром 10 мм на довжину 120 мм (12Ø) у бетон класу С25/30 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа армований сталеву фіброю з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (балки 2.2BF10.120), зміщення розпочалося за середнього значення зусилля $N_{S0} = 18,97$ кН (рис. 4.5). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 29,27$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 36,04$ кН. Вказані зусилля для балкових зразків 2.0В10.120, які не містили фібри, дорівнювали 14,62 кН, 23,67 кН і 27,85 кН відповідно. За дії максимальних витягувальних зусиль N_{Smax} зміщення стрижнів для балок 2.2BF8.80 у середньому дорівнювало 1,38 мм, а для балок 2.0В8.80 – 1,23 мм.

За закладання стрижнів діаметром 12 мм на довжину 120 мм (10Ø) у бетон класу C25/30 з призмочною міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа армований сталеву фібру з коефіцієнтом фібрового армування по об'єму 0,0125 (балки 2.2BF12.120), зміщення розпочалося за середнього значення зусилля $N_{S0} = 22,36$ кН (рис. 4.6). Зміщенню незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм відповідає зусилля $N_{S0,1} = 38,02$ кН, а максимальне зусилля за витягування стрижня $N_{Smax} = 44,72$ кН. Вказані зусилля для балкових зразків 2.0B10.120, які не містили фібри, дорівнювали 15,56 кН, 28,18 кН і 33,16 кН відповідно. За дії максимальних витягувальних зусиль N_{Smax} зміщення стрижнів для балок 2.2BF12.120 у середньому дорівнювало 1,35 мм, а для балок 2.0B12.120 – 1,26 мм.

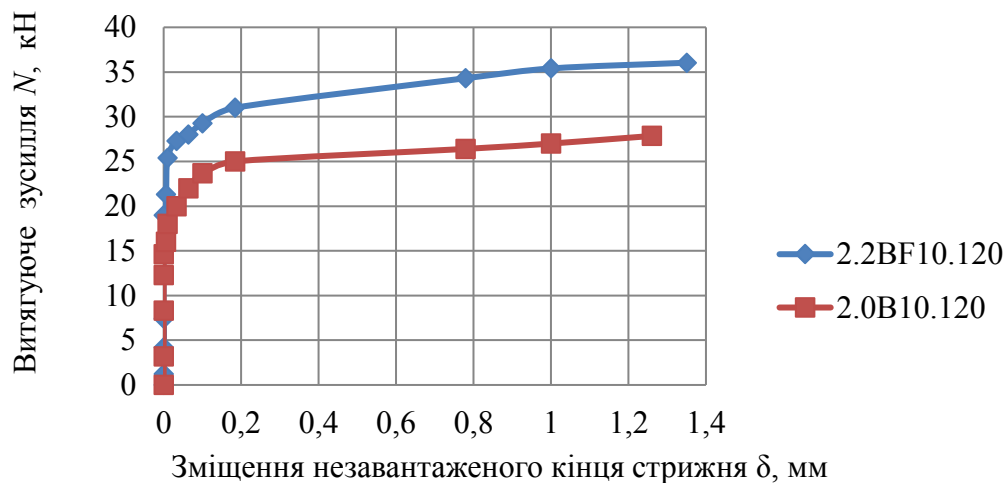


Рис. 4.5 – Залежність зміщення незавантажених кінців стрижнів від витягуювальних зусиль у балках 2.2BF10.120 і 2.0 B10.120

У балкових зразках 2.3BF10.100, які містили стрижні діаметром 10 мм, закладені у фібробетон на довжину 100 мм, виконані з бетону класу C25/30 з призмочною міцністю $f_{cm,prism} = 29,14$ МПа, армованого фібру ($\rho_{fv} = 0,018$) зміщення незавантажених кінців стрижнів розпочалося за зусилля $N_{S0} = 17,83$ кН (рис. 4.7). За зміщення стрижнів 0,1 мм зусилля $N_{S0,1} = 29,67$ кН, а $N_{Smax} = 34,25$ кН. У балках 2.0 B10.100, які не містили фібри, ці

зусилля дорівнювали 12,77 кН, 21,44 кН і 25,23 кН відповідно. За дії максимальних витягувальних зусиль N_{Smax} зміщення стрижнів для балок 2.3BF10.100 у середньому дорівнювало 1,34 мм, а для балок 2.0B10.100– 1,26 мм.

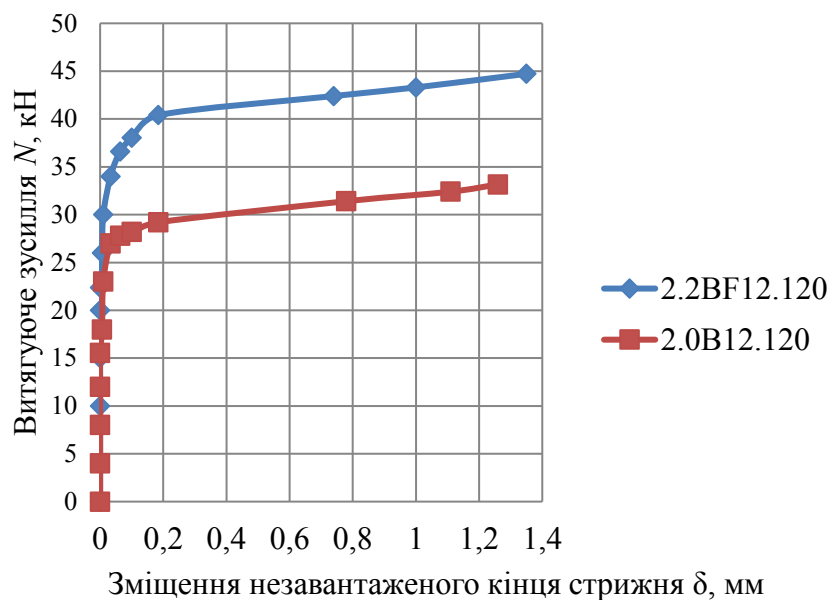


Рис. 4.6 – Залежність зміщення незавантажених кінців стрижнів від витягувальних зусиль у балках 2.2BF12.120 і 2.0 B12.120

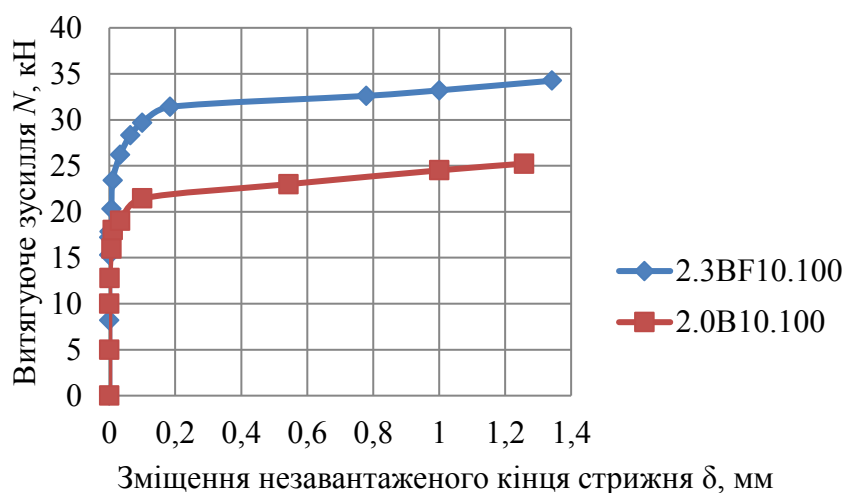


Рис. 4.7 – Залежність зміщення незавантажених кінців стрижнів від витягувальних зусиль у балках 2.3BF10.100 і 2.0 B10.100

У балкових зразках 3.2BF10.100, які містили стрижні діаметром 10 мм, закладені у фібробетон на довжину 100 мм, виконані з бетону класу С30/35 з призмовою міцністю $f_{cm,prism} = 34,75\text{МПа}$, армованого фіброю ($\rho_{fv} = 0,0125$) зміщення незавантажених кінців стрижнів розпочалося за зусилля $N_{S0} = 18,54\text{ кН}$ (рис. 4.8). За зміщення стрижнів 0,1 мм зусилля $N_{S0,1} = 30,10\text{ кН}$, а $N_{Smax} = 35,53\text{ кН}$. У балках 2.0 В10.80, які не містили фібри, ці зусилля дорівнювали 14,65 кН, 24,29 кН і 28,90 кН відповідно. За дії максимальних витягувальних зусиль N_{Smax} зміщення стрижнів для балок 3.0BF10.100 у середньому дорівнювало 1,34 мм, а для балок 2.0 В10.80 – 1,22 мм.

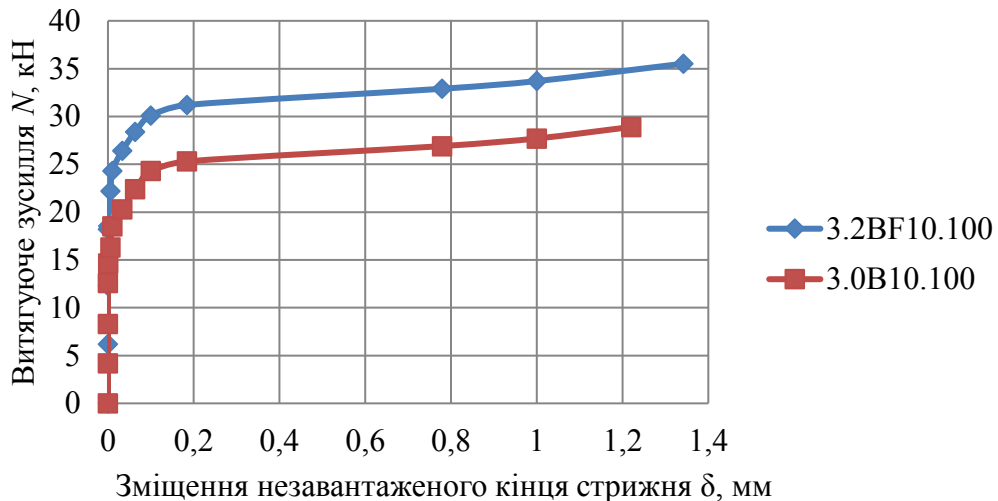


Рис.4.8 – Залежність зміщення незавантажених кінців стрижнів від витягувальних зусиль у балках 3.2BF10.100 і 3.0 В10.100

Таким чином, зсуви незавантажених кінців стрижнів, закладених у розтягнуту зону сталевібробетону балок, розпочиналися за більших навантажень порівняно з балками, які не містили фібрового армування. За зсувів незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм витягувальні зусилля у зразках, що містили фібру, завжди були більшими порівняно зі зразками без фібри. Це ж стосується максимальних витягувальних зусиль. Наприклад, порівнюючи зразки 2.2BF10.120 і 2.0В10.120, можна зауважити, що для цих зразків відношення витягувальних зусиль на початкові зсуву N_{S0} дорівнює

1,30, відношення зусиль за зсуву незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм $N_{S0,1}$ дорівнює 1,24, а відношення максимальних витягувальних зусиль N_{Smax} дорівнює 1,29.

4.2 Нормальні напруження у стрижнях і дотичні напруження між стрижнями і фібробетоном за витягування з розтягнутої зони сталеві фібробетону балок

Метою цих досліджень було з'ясування можливості використання рівнянь регресії, поданих у підрозділі 3.2, для оцінювання нормальних і дотичних напружень на початку зсуву незавантажених кінців стрижнів, за зсуву незавантажених кінців 0,1 мм та за максимальних витягувальних зусиль, коли стрижні витягуються з розтягнутої зони елементів балкового типу.

Програма досліджень передбачала, що на випадок, якщо б рівняння регресій ПФЕ 2⁴, подані у п. 3.2, незадовільно оцінювали експериментальні результати, то необхідно дослідити додаткові зразки для побудови плану експерименту, близького до оптимального (D4). У цьому разі до матриці плану ПФЕ 2⁴ додається матриця з восьми стрічок. Тому було виготовлено і випробувано призмкові зразки, які відповідають цій додатковій матриці, а також відповідні їм зразки балкового типу. Крім того, виготовлено та випробувано призмкові зразки, які не містили фібри, що дозволило проаналізувати питання ефективності фібрового армування за витягування стрижнів. Результати випробувань зразків призмкового типу, армованих фіброю, подано в таблицях 4.2 – 4.4. Середнє експериментальне значення призмкової міцності $f_{cm,prism}$ для бетону класу C25/30 дорівнює 29,14 МПа. Багаторазові спроби отримати склад бетону з призмковою міцністю, яка б чітко відповідала нульовому рівню варіювання ($f_{c,prism} = 30,41$ МПа), були марними. Тому результати випробувань, подані в таблицях 4.2 – 4.4, можна також розглядати як додаткову перевірку адекватності рівнянь регресії, отриманих у п. 3.2, у тому числі в точках, близьких до центру експерименту.

Напруження у завантажених кінцях стрижнів на початкові зсуву $\sigma_{S0,theor}$ теоретично оцінювали за формулою (3.18). Відношення експериментальних значень до теоретичних $\frac{\sigma_{S0,exp,m}}{\sigma_{S0,theor}} = 1,01 - 1,09$ (таблиця 4.2).

За максимальних значень витягувальних зусиль напруження у стрижнях σ_{Smax} , оцінювали з використанням рівняння регресії (3.23). Відношення $\frac{\sigma_{Smax,exp,m}}{\sigma_{Smax,theor}} = 0,98 - 1,09$ (таблиця 4.3).

За зміщення незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм напруження у стрижнях $\sigma_{S0,1}$ оцінювали з використанням рівняння регресії (3.23). Відношення $\frac{\sigma_{S0,1,exp}}{\sigma_{S0,1,theor}} = 1,004 - 1,052$ (таблиця 4.4).

Якщо за критерій втрати зчеплення стрижня з бетоном брати зсув його незавантаженого кінця 0,1 мм, то, як свідчать дані таблиці 4.4, розрахункового опору (435 МПа) напруження сягають у зразках 2.2PF10.120, 2.3PF10.100 і 3.2PF10.100.

Таким чином, експериментальні значення напружень у стрижнях при початкові зсуву за максимальних витягувальних зусиль та за зсуву незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм для більшості зразків були несуттєво більшими за теоретичні. Тому можна вважати, що рівняння регресії добре оцінюють вказані напруження.

Експериментальні значення напружень у стрижнях і дотичних напружень за витягування стрижнів з призм, які не містили фібри, подано в таблицях 4.5 – 4.7.

Потрібно зауважити, що за зсуву незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм у всіх випробуваних зразках, які не містили фібрового армування, напруження у стрижнях не досягали розрахункового опору (таблиця 4.6), і лише за максимальних витягувальних навантажень напруження σ_{Smax} дорівнювали 439,85 МПа і 445,51 МПа для зразків 2.0P10.120 і 3.0P10.100 відповідно. Про позитивний вплив фібрового армування на напруження за витягування стрижнів свідчать дані таблиць 4.8 – 4.10, у яких

порівняно напруження за початку зсуву стрижнів, за зсуву їх незавантажених кінців 0,1 мм і за максимальних витягувальних зусиль під час випробувань зразків, які містили фібру і зразків без фібрового армування.

Таблиця 4.2 – Експериментальні і теоретичні значення нормальних напружень в стрижнях за початку зсуву незавантажених кінців

Марки зразків призмового типу	Експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за початку зсуву $\sigma_{S0,exp}$, МПа	Середні експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за початку зсуву $\sigma_{S0,exp,m}$, МПа	Теоретичні значення нормальних напружень в арматурі за початку зсуву $\sigma_{S0,theor}$, МПа	$\frac{\sigma_{S0,exp,m}}{\sigma_{S0,theor}}$
1.2PF10.100.1	211,04	210,90	205,66	1,03
1.2PF10.100.2	213,55			
1.2PF10.100.3	208,11			
2.1PF10.100.1	231,09	228,36	208,98	1,09
2.1PF10.100.2	225,43			
2.1PF10.100.3	228,56			
2.2PF8.80.1	244,38	241,35	228,23	1,06
2.2PF8.80.2	242,18			
2.2PF8.80.3	237,49			
2.2PF10.80.1	198,25	201,08	186,91	1,08
2.2PF10.80.2	205,33			
2.2PF10.80.3	199,66			
2.2PF10.120.1	295,88	299,62	279,86	1,07
2.2PF10.120.2	299,81			
2.2PF10.120.3	303,17			
2.2PF12.120.1	238,05	241,35	238,53	1,01
2.2PF12.120.2	241,09			
2.2PF12.120.3	244,91			
2.3PF10.100.1	269,02	272,61	257,77	1,06
2.3PF10.100.2	275,99			
2.3PF10.100.3	272,82			
3.2PF10.100.1	284,11	285,79	281,14	1,02
3.2PF10.100.2	285,92			
3.2PF10.100.3	287,34			

Таблиця 4.3 – Експериментальні і теоретичні максимальні значення нормальних напружень в арматурі за зсуву

Марки зразків призмового типу	Експериментальні значення максимальних нормальних напружень в арматурі $\sigma_{Smax,exp}$, МПа	Середні експериментальні значення максимальних нормальних напружень в арматурі $\sigma_{Smax,exp,m}$, МПа	Теоретичні значення максимальних нормальних напружень $\sigma_{Smax,theor}$, МПа	$\frac{\sigma_{Smax,exp,m}}{\sigma_{Smax,theor}}$
1.2PF10.100.1	410,66	413,81	410,25	1,01
1.2PF10.100.2	412,32			
1.2PF10.100.3	418,45			
2.1PF10.100.1	456,27	456,72	441,52	1,03
2.1PF10.100.2	455,94			
2.1PF10.100.3	457,95			
2.2PF8.80.1	449,39	450,70	460,72	0,98
2.2PF8.80.2	454,79			
2.2PF8.80.3	447,92			
2.2PF10.80.1	408,38	410,16	418,39	0,98
2.2PF10.80.2	412,98			
2.2PF10.80.3	409,12			
2.2PF10.120.1	566,14	569,24	520,35	1,09
2.2PF10.120.2	569,09			
2.2PF10.120.3	572,49			
2.2PF12.120.1	483,66	482,70	468,02	1,03
2.2PF12.120.2	483,51			
2.2PF12.120.3	480,93			
2.3PF10.100.1	520,79	523,51	487,22	1,07
2.3PF10.100.2	524,13			
2.3PF10.100.3	525,61			
3.2PF10.100.1	548,13	547,59	508,63	1,08
3.2PF10.100.2	552,10			
3.2PF10.100.3	542,54			

Таблиця 4.4– Експериментальні і теоретичні значення нормальних напружень в арматурі $\sigma_{S0,1}$ за зсуві незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм

Марки зразків призмового типу	Експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за зміщення 0,1 мм $\sigma_{S0,1,exp}$, МПа	Середні експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за зміщення 0,1 мм $\sigma_{S0,1,exp}$, МПа	Теоретичні значення нормальних напружень в арматурі за зміщення 0,1 мм $\sigma_{S0,1,theor}$, МПа	$\frac{\sigma_{S0,1,exp}}{\sigma_{S0,1,theor}}$
1.2PF10.100.1	347,89	351,60	350,14	1,004
1.2PF10.100.2	350,42			
1.2PF10.100.3	356,49			
2.1PF10.100.1	398,11	394,80	376,51	1,049
2.1PF10.100.2	393,95			
2.1PF10.100.3	392,34			
2.2PF8.80.1	411,11	415,20	394,76	1,052
2.2PF8.80.2	417,60			
2.2PF8.80.3	416,89			
2.2PF10.80.1	369,46	368,64	352,44	1,046
2.2PF10.80.2	369,91			
2.2PF10.80.3	366,55			
2.2PF10.120.1	422,59	462,24	444,39	1,040
2.2PF10.120.2	479,91			
2.2PF10.120.3	484,22			
2.2PF12.120.1	410,32	410,40	402,06	1,021
2.2PF12.120.2	411,67			
2.2PF12.120.3	409,21			
2.3PF10.100.1	457,04	453,60	431,28	1,052
2.3PF10.100.2	451,06			
2.3PF10.100.3	452,70			
3.2PF10.100.1	465,66	464,00	442,67	1,048
3.2PF10.100.2	465,87			
3.2PF10.100.3	460,47			

Таблиця 4.5– Експериментальні значення нормальних і дотичних напружень за початку зсуву стрижнів для зразків, які не містили фібри

Марки зразків призмового типу	Експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за початку зсуву $\sigma_{S0,exp}$, МПа	Середні експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за початку зсуву $\sigma_{S0,exp,m}$, МПа	Середні експериментальні значення дотичних напружень за початку зсуву $\tau_{b0,exp,m}$, МПа
1.0P10.100.1	169,33	167,12	4,18
1.0P10.100.2	172,41		
1.0P10.100.3	159,62		
2.0P8.80.1	187,15	184,94	4,62
2.0P8.80.2	186,30		
2.0P8.80.3	181,37		
2.0P10.80.1	152,70	155,95	4,87
2.0P10.80.2	155,77		
2.0P10.80.3	159,38		
2.0P10.100.1	193,66	195,18	4,87
2.0P10.100.2	197,65		
2.0P10.100.3	194,23		
2.0P10.120.1	230,71	230,92	4,81
2.0P10.120.2	234,13		
2.0P10.120.3	227,92		
2.0P12.120.1	184,84	187,94	4,70
2.0P12.120.2	191,51		
2.0P12.120.3	187,47		
3.0P10.100.1	225,05	225,80	5,65
3.0P10.100.2	223,04		
3.0P10.100.3	229,31		

Таблиця 4.6 – Експериментальні максимальні значення нормальних і дотичних напружень за зсуву стрижнів для зразків, які не містили фібри

Марки зразків призмового типу	Експериментальні значення максимальних нормальних напружень в арматурі за зсуву $\sigma_{Smax,exp}$, МПа	Середні експериментальні значення максимальних нормальних напружень в арматурі за зсуву $\sigma_{Smax,exp,m}$, МПа	Середні експериментальні значення максимальних дотичних напружень за зсуву $\tau_{Smax,exp,m}$, МПа
1.0P10.100.1	360,98	359,62	8,99
1.0P10.100.2	359,31		
1.0P10.100.3	358,57		
2.0P8.80.1	355,72	350,07	8,75
2.0P8.80.2	349,78		
2.0P8.80.3	344,71		
2.0P10.80.1	312,86	309,90	9,68
2.0P10.80.2	311,17		
2.0P10.80.3	305,67		
2.0P10.100.1	385,91	385,62	9,64
2.0P10.100.2	389,99		
2.0P10.100.3	380,96		
2.0P10.120.1	437,99	439,85	9,16
2.0P10.120.2	440,41		
2.0P10.120.3	441,15		
2.0P12.120.1	360,09	357,87	8,95
2.0P12.120.2	356,77		
2.0P12.120.3	356,75		
3.0P10.100.1	437,93	445,51	11,14
3.0P10.100.2	440,72		
3.0P10.100.3	442,88		

Таблиця 4.7 – Експериментальні значення нормальних і дотичних напружень при зсуві незавантаженого кінця стрижнів 0,1 мм для зразків, які не містили фібри

Марки зразків призмового типу	Експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за зміщення 0,1 мм $\sigma_{S0,1,exp}$, МПа	Середні експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за зміщення 0,1 мм $\sigma_{S0,1,exp,m}$, МПа МПа	Середні експериментальні значення дотичних напружень за зміщення 0,1 мм $\tau_{S0,1,exp,m}$, МПа
1.0P10.100.1	306,83	305,67	7,64
1.0P10.100.2	305,41		
1.0P10.100.3	304,78		
2.0P8.80.1	302,36	297,56	7,44
2.0P8.80.2	297,31		
2.0P8.80.3	293,00		
2.0P10.80.1	265,93	263,42	8,23
2.0P10.80.2	264,50		
2.0P10.80.3	259,82		
2.0P10.100.1	328,02	327,78	8,19
2.0P10.100.2	331,49		
2.0P10.100.3	323,82		
2.0P10.120.1	372,29	373,87	7,79
2.0P10.120.2	374,35		
2.0P10.120.3	374,98		
2.0P12.120.1	306,08	304,19	7,60
2.0P12.120.2	303,25		
2.0P12.120.3	303,24		
3.0P10.100.1	372,24	374,43	9,36
3.0P10.100.2	374,61		
3.0P10.100.3	376,45		

Таблиця 4.8 – Порівняння середніх експериментальних значень напружень в арматурі за початку зсуву для бетонних і фібробетонних зразків

Марки зразків без фібри	Середні експериментальні значення нормальних напружень в арматурі на початку зсуву $\sigma_{S0,exp,m}$, МПа	Марки зразків з фіброю	Середні експериментальні значення нормальних напружень в арматурі на початку зсуву $\sigma_{S0,exp,m}$, МПа	Відношення середніх напружень в арматурі на початку зсуву зразків з фіброю і без фібри
1.0P10.100	167,12	1.2PF10.100	210,90	1,26
2.0P10.100	195,18	2.1PF10.100	228,36	1,17
2.0P8.80	184,94	2.2PF8.80	241,35	1,31
2.0P10.80	155,95	2.2PF10.80	201,08	1,29
2.0P10.120	230,92	2.2PF10.120	299,62	1,30
2.0P12.120	187,94	2.2PF12.120	241,35	1,28
2.0P10.100	195,18	2.3PF10.100	272,61	1,40
3.0P10.100	225,80	3.2PF10.100	285,79	1,27

Таблиця 4.9 – Порівняння середніх експериментальних значень напружень в арматурі за зсуву стрижнів 0,1 мм для бетонних і фібробетонних зразків

Марки зразків без фібри	Середні експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за зміщення 0,1 мм $\sigma_{S0,1,exp,m}$, МПа	Марки зразків з фіброю	Середні експериментальні значення нормальних напружень в арматурі за зміщення 0,1 мм $\sigma_{S0,1,exp,m}$, МПа	Відношення максимальних нормальних напружень в арматурі за зсуву зразків з фіброю і без фібри
1.0P10.100	305,67	1.2PF10.100	351,60	1,15
2.0P10.100	327,78	2.1PF10.100	394,80	1,20
2.0P8.80	297,56	2.2PF8.80	415,20	1,40
2.0P10.80	263,42	2.2PF10.80	368,64	1,40
2.0P10.120	373,87	2.2PF10.120	462,24	1,24
2.0P12.120	304,19	2.2PF12.120	410,40	1,35
2.0P10.100	327,78	2.3PF10.100	453,60	1,38
3.0P10.100	374,43	3.2PF10.100	464,00	1,24

Таблиця 4.10 – Порівняння середніх експериментальних значень напружень в арматурі за максимальних значень витягувального зусилля для бетонних і фібробетонних зразків

Марки зразків без фібри	Середні експериментальні значення максимальних нормальних напружень в арматурі за зсуву $\sigma_{Smax,exp}$, МПа	Марки зразків з фіброю	Середні експериментальні значення максимальних нормальних напружень в арматурі за зсуву $\sigma_{Smax,exp}$, МПа	Відношення середніх максимальних нормальних напружень в арматурі за зсуву зразків з фіброю і без фібри
1.0P10.100	359,62	1.2PF10.100	413,81	1,15
2.0P10.100	385,62	2.1PF10.100	456,72	1,18
2.0P8.80	350,07	2.2PF8.80	450,70	1,29
2.0P10.80	309,90	2.2PF10.80	410,16	1,32
2.0P10.120	439,85	2.2PF10.120	569,24	1,29
2.0P12.120	357,87	2.2PF12.120	482,70	1,34
2.0P10.100	385,62	2.3PF10.100	523,51	1,36
3.0P10.100	445,51	3.2PF10.100	547,59	1,23

Відношення середніх напружень в арматурі на початку зсуву зразків з фіброю і без фібри σ_{S0} дорівнює 1,17 – 1,40, відношення середніх напружень у стрижнях за їх зсуву 0,1 мм зразків з фіброю і без фібри $\sigma_{S0,1}$ дорівнює 1,15 – 1,40, а відношення середніх напружень у стрижнях за максимального витягувального зусилля зразків з фіброю і без фібри σ_{Smax} дорівнювало 1,15 – 1,36. Ці відношення є різними і залежать від класу бетону, вмісту фібрової арматури та відносною довжини закладання стрижнів.

Результати досліджень анкерування стрижнів кільцевого профілю було проаналізовано свого часу в НИИЖБ, що дозволило встановити залежність між відносною довжиною анкерування арматури періодичного профілю, максимальними напруженнями арматури за витягування і міцністю бетону [77]:

$$\frac{l_b}{\phi} = \eta \frac{\sigma_s}{f_{c,prism}}, \quad (4.1)$$

де σ_s – максимальні напруження у стрижні за витягування з бетону; η – коефіцієнт зчеплення арматури з бетоном, який для арматури періодичного кільцевого профілю дорівнює 0,6, а для гладкої арматури – 1,2.

За результатами наших досліджень, поданих у таблиці 4.6, визначали значення коефіцієнта η . Виявилось, що він має значення в межах 0,72 – 0,85, а в середньому – 0,78, тобто на 30% більший за такий коефіцієнт для арматури періодичного кільцевого профілю. На те, що необхідна довжина анкерування арматури серпоподібного профілю на 30 – 50% більша порівняно з арматурою кільцевого профілю, вказано також у праці [92]. Ми також проаналізували результати експериментів О. С. Чапука з витягування стрижнів серпоподібного профілю із бетону [23; 102]. Цей коефіцієнт за зсуву незавантаженого кінця стрижнів 0,2 мм дорівнює 0,83, що в 1,4 разу менше за такий коефіцієнт для арматури кільцевого профілю.

На початкові зсувів незавантажених кінців стрижнів за їх витягування з розтягнутої зони балкових зразків напруження у стрижнях σ_{s0} були завжди більшими у зразках, які містили фіброве армування (таблиця 4.11).

Можна зауважити, що для балок 2.1BF10.100 порівняно з балками 2.0B10.100 напруження σ_{s0} збільшилися на 14%, а для балок 2.3BF10.100 порівняно з балками 2.0B10.100 – на 40%. Отже, вплив вмісту фібри суттєво впливає на вказані напруження. Навіть зниження класу бетону з C25/30 до C20/25 з одночасним збільшенням коефіцієнта фібрового армування ρ_{fv} з 0,007 до 0,0125 призвело до підвищення напружень σ_{s0} у порівнянні зі зразками без фібри з 13% до 24% (зразки 2.1BF10.100 і 1.2BF10.100).

Експериментальні значення напружень стрижнів балкових зразків $\sigma_{s0,b,exp}$ і дотичних напружень на початкові зсуву $\tau_{b0,b,exp}$ порівнювали з відповідними експериментальними значеннями зразків призмового типу $\sigma_{s0,prism,exp}$ і $\tau_{b0,prism,exp}$ (таблиця 4.12). Виявилось, що середнє значення відношень вказаних напружень дорівнює 0,82.

Таблиця 4.11 – Порівняння напружень σ_{S0} на початкові зсуву стрижнів для сталевібробетонних і бетонних балок

Марки фібробетонних зразків	Середнє значення напружень σ_{S0} , МПа	Марки бетонних зразків	Середнє значення σ_{S0} , МПа	Відношення σ_{S0} фібробетонних зразків до бетонних
1.2BF10.100	172,42	1.0B10.100	139,28	1,24
2.1BF10.100	183,63	2.0B10.100	162,65	1,13
2.2BF8.80	197,83	2.0B8.80	151,59	1,31
2.2BF10.80	168,97	2.0B10.80	130,97	1,29
2.2BF10.120	241,63	2.0B10.120	186,23	1,30
2.2BF12.120	197,83	2.0B12.120	137,66	1,44
2.3BF10.100	227,18	2.0B10.100	162,65	1,40
3.2BF10.100	236,19	3.0B10.100	186,61	1,27

Таким чином, напруження в стрижнях і дотичні напруження на початкові зсувів стрижнів для балкових зразків у середньому на 18% менші за відповідні напруження для призмових зразків, і їх пропонуємо розраховувати з використанням рівнянь регресії, отриманих у п. 3.2, праву частину яких помножено на коефіцієнт 0,82:

$$\sigma_{S0,b} = 0,82 \left[239,9 + 34,24 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 47,98 \frac{l_b/\phi - 10}{2} + 22,85 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 3,65 \frac{\phi - 10}{2} + 6,85 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_b/\phi - 10}{2} \right) + 3,26 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) + 4,57 \left(\frac{l_b/\phi - 10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) \right]; \quad (4.2)$$

$$\tau_{b0,b} = 0,82 \left[6 + 0,86 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 0,57 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 0,09 \frac{\phi - 10}{2} + 0,08 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) \right]. \quad (4.3)$$

Відношення експериментальних значень цих напружень до теоретичних, обчислених за формулами (4.2) і (4.3), подано в таблиці 4.12, і вони є в діапазоні 0,99 – 1,07.

За максимальних витягувальних зусиль, докладених до стрижнів за витягування з розтягнутої зони балкових зразків напруження у стрижнях $\sigma_{Smax,b}$ у всіх зразках, які містили фіброве армування, були більші за такі напруження, ніж у зразках без фібри (таблиця 4.14). Експериментальні значення напружень стрижнів балкових зразків за дії максимальних витягувальних зусиль $\sigma_{Smax,b,exp}$ і дотичних напружень $\tau_{bmax,b,exp}$ порівнювали з відповідними експериментальними значеннями зразків призмового типу $\sigma_{Smax,prism,exp}$ і $\tau_{bmax,prism,exp}$ (таблиця 4.14). Середні значення відношень вказаних напружень, як і для початку зсуву, дорівнює 0,82.

Отже, напруження в стрижнях і дотичні напруження за дії максимальних витягувальних зусиль для балкових зразків у середньому на 18% менші за відповідні напруження для призмових зразків, і їх пропонуємо розраховувати з використанням рівнянь регресії, отриманих у п. 3.2, праву частину помножено на коефіцієнт 0,82:

$$\sigma_{Smax,b} = 0,82 \left[474,39 + 64,14 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 91,41 \frac{l_b/\phi-10}{2} + 41,13 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 7,72 \frac{\phi-10}{2} + 9,07 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_b/\phi-10}{2} \right) + 4,24 \left(\frac{l_b/\phi-10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) \right]; \quad (4.4)$$

$$\tau_{bmax,b} = 0,82 \left[11,88 + 1,62 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 1,05 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 0,2 \frac{\phi-10}{2} - 0,1 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_b/\phi-10}{2} \right) + 0,1 \left(\frac{l_b/\phi-10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) \right]. \quad (4.5)$$

Цікаво зауважити, що найбільше експериментальне середнє значення напруження $\sigma_{Smax,b}$ отримано за випробувань балкових зразків 2.2BF10.120, і воно дорівнювало 459,11 МПа. Тобто воно було більшим за розрахунковий опір стрижнів класу А500С (434,77 МПа). У зразках 2.3BF10.100 $\sigma_{Smax,b} = 436,31$ МПа, а в зразках 3.2BF10.100 $\sigma_{Smax,b} = 452,61$ МПа.

Таблиця 4.12 – До розрахунку напружень $\sigma_{S0,b}$ завантажених кінців стрижнів на початкові їх зсуву в розтягнутій зоні фібробетонних зразків балкового типу та відповідних дотичних напружень між стрижнями і фібробетоном $\tau_{b0,b}$

Марки балкових зразків	$\sigma_{S0,b,exp}$ балкових зразків, МПа	Марки призмових зразків	$\sigma_{S0,prism,exp}$ призмових зразків, МПа	$\frac{\sigma_{S0,b,exp}}{\sigma_{S0,prism,exp}}$	$k_m = \left(\frac{\sigma_{S0,b,exp}}{\sigma_{S0,prism,exp}} \right)_m$	$\sigma_{S0,b,theor}$ за формулою (4.2), МПа	$\frac{\sigma_{S0,b,exp}}{\sigma_{S0,b,theor}}$
1.2BF10.100	172,42	1.2PF10.100	210,90	0,82	0,82	168,64	1,02
2.1BF10.100	183,63	2.1 PF 10.100	228,36	0,80		177,98	1,03
2.2BF8.80	197,83	2.2 PF 8.80	241,35	0,82		193,73	1,02
2.2BF10.80	168,97	2.2 PF 10.80	201,08	0,84		157,37	1,07
2.2BF10.120	241,63	2.2 PF 10.120	299,62	0,81		236,06	1,02
2.2BF12.120	197,83	2.2 PF 12.120	241,35	0,82		199,71	0,99
2.3BF10.100	227,18	2.3BF10.100	272,61	0,83		215,46	1,05
3.2BF10.100	236,19	3.2PF10.100	285,79	0,83		224,79	1,05
Марки балкових зразків	$\tau_{b0,b,exp}$ балкових зразків, МПа	Марки призмових зразків	$\tau_{b0,prism,exp}$ призмових зразків, МПа	$\frac{\tau_{b0,b,exp}}{\tau_{b0,prism,exp}}$	$k_m = \left(\frac{\tau_{b0,b,exp}}{\tau_{b0,prism,exp}} \right)_m$	$\tau_{b0,b,theor}$ за формулою (4.3), МПа	$\frac{\tau_{b0,b,exp}}{\tau_{b0,b,theor}}$
1.2BF10.100	4,31	1.2PF10.100	5,27	0,82	0,82	4,21	1,02
2.1BF10.100	4,59	2.1 PF 10.100	5,71	0,80		4,45	1,03
2.2BF8.80	4,95	2.2 PF 8.80	6,03	0,82		4,85	1,02
2.2BF10.80	5,28	2.2 PF 10.80	6,28	0,84		4,92	1,07
2.2BF10.120	5,03	2.2 PF 10.120	6,24	0,81		4,92	1,02
2.2BF12.120	4,95	2.2 PF 12.120	6,03	0,82		4,99	0,99
2.3BF10.100	5,68	2.3BF10.100	6,82	0,83		5,39	1,05
3.2BF10.100	5,90	3.2PF10.100	7,14	0,83		5,63	1,05

Таблиця 4.13 – Порівняння напружень $\sigma_{S,max,b}$ за дії максимальних витягувальних зусиль для сталевібробетонних і бетонних балок

Марки фібробетонних зразків	Середнє значення $\sigma_{S,max,b}$, МПа	Марки бетонних зразків	Середнє значення $\sigma_{S,max,b}$, МПа	Відношення $\sigma_{S,max,b}$ фібробетонних зразків до бетонних
1.2BF10.100	344,84	1.0B10.100	278,60	1,24
2.1BF10.100	364,71	2.0B10.100	321,40	1,13
2.2BF8.80	375,60	2.0B8.80	287,02	1,32
2.2BF10.80	344,71	2.0B10.80	260,38	1,32
2.2BF10.120	459,11	2.0B10.120	354,78	1,29
2.2BF12.120	395,61	2.0B12.120	293,35	1,35
2.3BF10.100	436,31	2.0B10.100	321,40	1,36
3.2BF10.100	452,61	3.0B10.100	368,15	1,23

Відношення експериментальних значень $\sigma_{Smax,b}$ і $\tau_{b,max,b}$ до теоретичних, обчислених за формулами (4.4) і (4.5), подано в таблиці 4.14, і вони є в діапазоні 0,98 – 1,10.

За витягувальних зусиль, що відповідають зсувові незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм, за витягування з розтягнутої зони балкових зразків, напруження у стрижнях $\sigma_{S0,1,b}$ у всіх зразках, які містили фіброве армування, були більшими за такі напруження порівняно зі зразками, що не містили фібри (таблиця 4.15).

Експериментальні значення напружень стрижнів балкових зразків за дії витягувальних зусиль, які відповідали зсувові незавантажених кінців стрижнів 0,1 мм, $\sigma_{S0,1,b,exp}$ і відповідних дотичних напружень $f_{b,b,exp}$ порівнювали з відповідними експериментальними значеннями зразків призматичного типу $\sigma_{S0,1,prism,exp}$ і $f_{b,prism,exp}$ (таблиця 4.16). Середнє значення відношень вказаних напружень дорівнює 0,81.

Таблиця 4.14 – До розрахунку напружень $\sigma_{S,max,b}$ завантажених кінців стрижнів на початкові їх зсуву в розтягнутій зоні фібробетонних зразків балкового типу та відповідних дотичних напружень між стрижнями і фібробетоном $\tau_{b,,max,b}$

Марки балкових зразків	$\sigma_{S,max,b,exp}$ балкових зразків, МПа	Марки призмових зразків	$\sigma_{S,max,prism,exp}$ призмових зразків, МПа	$\frac{\sigma_{Smax,b,exp}}{\sigma_{Smax,prism,exp}}$	$k_m = \left(\frac{\sigma_{S,max,b,exp}}{\sigma_{S,max,prism,exp}} \right)$	$\sigma_{S,max,b,theor}$ за формулою (4.4), МПа	$\frac{\sigma_{S,max,b,exp}}{\sigma_{S,max,b,theor}}$
1.2BF10.100	344,84	1.2PF10.100	413,81	0,83	0,82	336,41	1,03
2.1BF10.100	364,71	2.1 PF 10.100	456,72	0,80		355,27	1,03
2.2BF8.80	375,60	2.2 PF 8.80	450,70	0,83		382,67	0,98
2.2BF10.80	344,71	2.2 PF 10.80	410,16	0,84		314,04	1,10
2.2BF10.120	459,11	2.2 PF 10.120	569,24	0,81		463,97	0,99
2.2BF12.120	395,61	2.2 PF 12.120	482,70	0,82		395,33	1,001
2.3BF10.100	436,31	2.3BF10.100	523,51	0,83		422,73	1,03
3.2BF10.100	452,61	3.2PF10.100	547,59	0,83		443,23	1,02
Марки балкових зразків	$\tau_{b,max,b,exp}$ балкових зразків, МПа	Марки призмових зразків	$\tau_{b,max,prism,exp}$ призмових зразків, МПа	$\frac{\tau_{b,max,b,exp}}{\tau_{b,max,prism,exp}}$	$k_m = \left(\frac{\tau_{b,max,b,exp}}{\tau_{b,max,prism,exp}} \right)$	$\tau_{b,max,b,theor}$ за формулою (4.5)	$\frac{\tau_{b,max,b,exp}}{\tau_{b,max,b,theor}}$
1.2BF10.100	8,62	1.2PF10.100	10,35	0,83	0,82	8,41	1,03
2.1BF10.100	9,12	2.1 PF 10.100	11,42	0,80		8,88	1,03
2.2BF8.80	9,39	2.2 PF 8.80	11,27	0,83		9,57	0,98
2.2BF10.80	10,77	2.2 PF 10.80	12,82	0,84		9,81	1,10
2.2BF10.120	9,57	2.2 PF 10.120	11,86	0,81		9,67	0,99
2.2BF12.120	9,895	2.2 PF 12.120	12,07	0,82		9,88	1,001
2.3BF10.100	10,91	2.3BF10.100	13,09	0,83		10,57	1,03
3.2BF10.100	11,32	3.2PF10.100	13,69	0,83		11,08	1,02

Потрібно зауважити, що в праці [25] для теоретичного оцінювання міцності зчеплення стрижнів із фібробетоном балкових зразків використовували рівняння (3.30), праву частину якого пропонувалося помножити на коефіцієнт 0,84 як середнє значення відношень міцності зчеплення до теоретичного значення відповідних зразків.

Подальший аналіз показав, що ліпше співвідносити експериментальні значення міцності зчеплення стрижнів з фібробетоном балкових і призових зразків. Використання коефіцієнта 0,81 замість 0,84 дозволяє ліпше зблизити експериментальні результати з теоретичними. Тому рівняння для визначення $\sigma_{S0,1}$ і f_b балкових елементів мають вигляд;

$$\sigma_{S0,1} = 0,81 \left[408,43 + 58,29 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 81,69 \frac{l_b/\phi - 10}{2} + 38,64 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 6,22 \frac{\phi - 10}{2} + 11,66 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{l_b/\phi - 10}{2} \right) + 5,52 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) + 7,73 \left(\frac{l_b/\phi - 10}{2} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) \right]. \quad (4.6)$$

$$f_b = 0,81 \left[10,2 + 1,45 \frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} + 0,97 \frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} + 0,16 \frac{\phi - 10}{2} + 0,14 \left(\frac{f_{cm,prism}^{-30,41}}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}^{-0,0125}}{0,0055} \right) \right]. \quad (4.7)$$

Таблиця 4.15 – Порівняння напружень $\sigma_{S0,1,b}$ за дії максимальних витягувальних зусиль для сталевих фібробетонних і бетонних балок

Марки фібробетонних зразків	Середнє значення $\sigma_{S0,1,b}$, МПа	Марки бетонних зразків	Середнє значення $\sigma_{S0,1,b}$, МПа	Відношення $\sigma_{S0,1,b}$ фібробетонних зразків до бетонних
.2BF10.100	293,20	1.0B10.100	254,78	1,15
2.1BF10.100	312,00	2.0B10.100	273,12	1,14
2.2BF8.80	340,40	2.0B8.80	243,83	1,40
2.2BF10.80	279,68	2.0B10.80	221,40	1,26
2.2BF10.120	372,96	2.0B10.120	301,53	1,24
2.2BF12.120	336,40	2.0B12.120	249,29	1,35
2.3BF10.100	378,00	2.0B10.100	273,12	1,38
3.2BF10.100	383,60	3.0B10.100	309,43	1,24

Таблиця 4.16 – До розрахунку напружень $\sigma_{S0,1,b}$ завантажених кінців стрижнів за зсуву в розтягнутій зоні фібробетонних зразків балкового типу та відповідних дотичних напружень між стрижнями і фібробетоном $f_{b,,b}$

Марки балкових зразків	$\sigma_{S0,1,b,exp}$ балкових зразків, МПа	Марки призмових зразків	$\sigma_{S0,1,prism,exp}$ призмових зразків, МПа	$\frac{\sigma_{S0,1,b,exp}}{\sigma_{S0,1,prism,exp}}$	$k_m = \left(\frac{\sigma_{S0,1,b,exp}}{\sigma_{S0,1,prism,exp}} \right)_m$	$\sigma_{S0,1,b,theor}$	$\frac{\sigma_{S0,1,b,exp}}{\sigma_{S0,1,b,theor}}$
1.2BF10.100	293,20	1.2PF10.100	351,60	0,83	0,81	283,61	1,034
2.1BF10.100	312,00	2.1 PF 10.100	394,80	0,79		299,53	1,042
2.2BF8.80	340,40	2.2 PF 8.80	415,20	0,82		325,79	1,045
2.2BF10.80	279,68	2.2 PF 10.80	368,64	0,76		264,66	1,057
2.2BF10.120	372,96	2.2 PF 10.120	462,24	0,81		396,99	0,939
2.2BF12.120	336,40	2.2 PF 12.120	410,40	0,82		335,87	1,002
2.3BF10.100	378,00	2.3BF10.100	453,60	0,83		362,13	1,044
3.2BF10.100	383,60	3.2PF10.100	464,00	0,83		378,04	1,015
Марки балкових зразків	$f_{b,b,exp}$ балкових зразків, МПа	Марки призмових зразків	$f_{b,prism,exp}$ призмових зразків, МПа	$\frac{f_{b,b,exp}}{f_{b,prism,exp}}$	$k_m = \left(\frac{f_{b,b,exp}}{f_{b,prism,exp}} \right)_m$	$f_{b,,b,theor}$	$\frac{f_{b,b,exp}}{f_{b,b,theor}}$
1.2BF10.100	7,33	1.2PF10.100	8,79	0,83	0,81	7,09	1,03
2.1BF10.100	7,80	2.1 PF 10.100	9,87	0,79		7,62	1,02
2.2BF8.80	8,51	2.2 PF 8.80	10,38	0,82		7,99	1,07
2.2BF10.80	8,74	2.2 PF 10.80	11,52	0,76		8,92	0,98
2.2BF10.120	7,77	2.2 PF 10.120	9,63	0,81		7,50	1,04
2.2BF12.120	8,41	2.2 PF 12.120	10,26	0,82		8,14	1,03
2.3BF10.100	9,45	2.3BF10.100	11,34	0,83		8,73	1,08
3.2BF10.100	9,59	3.2PF10.100	11,60	0,83		8,97	1,07

4.3 Пропозиції щодо розрахунку анкерування стрижневої поздовжньої арматури у сталеві фібробетоні

Згідно з Єврокодом 2 [52] та ДСТУ [46] розрахункове значення граничних напружень зчеплення визначають за формулою:

$$f_{bd} = 2,25\eta_1\eta_2f_{ctd}, \quad (4.6)$$

де f_{ctd} – розрахункове значення міцності бетону на розтяг;

η_1 – коефіцієнт, який залежить від умов зчеплення і розміщення стрижнів (за хороших умов $\eta_1 = 1$);

η_2 – коефіцієнт, який залежить від діаметра стрижня ($\eta_2 = 1$ для $\emptyset \leq 32$ мм).

За результатами випробувань на витягування стрижнів з розтягнутої зони бетонних балкових елементів, поданих у п. 4.3, та маючи на увазі, що в даних дослідженнях коефіцієнти $\eta_1 = 1$ і $\eta_2 = 1$, проаналізуємо формулу (4.6). Оскільки експериментально отримано дані про середню міцність фібробетону на розтяг f_{ctm} та умовні граничні значення напружень зчеплення f_b , які відповідають зміщенню незавантаженого кінця стрижня на 0,1 мм, то подамо формулу (4.6) у вигляді:

$$f_b = kf_{ctm}, \quad (4.7)$$

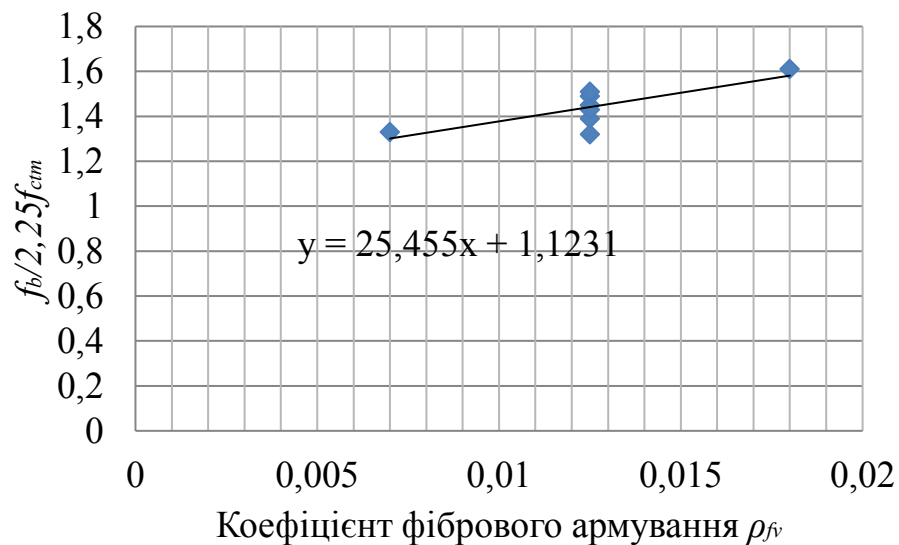
де k – коефіцієнт, визначений за даними наших експериментів (таблиця 4.17).

За результатами наших експериментів встановлено, що середнє значення коефіцієнта $k = 2,56$, а для пар балок-близнюків він має значення в межах 2,34...2,72. Коефіцієнт варіації для k дорівнює 0,062. Таким чином, цей коефіцієнт більший за коефіцієнт 2,25 у формулі (4.6) на 13,8%, що можна віднести у запас міцності зчеплення стрижнів з бетоном. Якщо взяти до уваги, що для балок 2.0B8.80 цей коефіцієнт дорівнює 2,34, то тут вказане перевищення дорівнює 4%. Тому для аналізу результатів, отриманих із випробувань балкових сталеві фібробетонних зразків використовуватимемо значення коефіцієнта 2,25.

За результатами випробувань на витягування стрижнів з фібробетонних балок (таблиця 4.16) побудуємо графік “ $f_b/2,25f_{ctm} - \rho_{fv}$ ” (Рис. 4.9).

Таблиця 4.17 – До визначення коефіцієнта k

Марки бетонних зразків	Середнє значення $\sigma_{s0,1,b}$, МПа	Середнє значення f_b , МПа	Середнє значення f_{ctm} , МПа	k	Середнє значення k	Коеф. варіації
1.0В10.100	254,78	6,37	2,34	2,72	2,56	0,062
2.0В10.100	273,12	6,83	2,61	2,62		
2.0В8.80	243,83	6,1	2,61	2,34		
2.0В10.80	221,4	6,92	2,61	2,65		
2.0В10.120	301,53	6,28	2,61	2,41		
2.0В12.120	249,29	6,23	2,61	2,39		
2.0В10.100	273,12	6,83	2,61	2,62		

Рис. 4.9 – Залежність відносної міцності зчеплення $f_b/2,25f_{ctm}$ від коефіцієнта фібрового армування за об'ємом ρ_{fv}

Таким чином, рівняння для визначення граничних напружень зчеплення стрижнів з фібробетоном балок набуде вигляду:

$$f_b = 2,25(1,12 + 25,46\rho_{fv})f_{ctm}. \quad (4.8)$$

Результати розрахунків f_b за формулою (4.8) подано в таблиці 4.18, та порівняння їх з експериментальними даними свідчить про те, що для пар балок-близнюків 1.2BF10.100 і 2.2BF10.120 теоретичні значення перевищують експериментальні на 3...8%. Для двох балок-близнюків 2.2BF12.120 це перевищення дорівнює 0,5%.

Таблиця 4.18 – Оцінювання міцності зчеплення стрижнів з фібробетоном із використанням методики Єврокод 2

Марки зразків	Коефіцієнт фібрового армування ρ_{fv}	Середнє значення f_b , МПа	Середнє значення f_{ctm} , МПа	$\frac{f_b}{2,25f_{ctm}}$	$f_{b(4.8)}$, МПа	$\frac{f_b}{f_{b(4.8)}}$
1.2BF10.100	0,0125	7,33	2,34	1,39	7,57	0,97
2.1BF10.100	0,007	7,80	2,61	1,33	7,62	1,02
2.2BF8.80	0,0125	8,51	2,61	1,45	8,45	1,01
2.2BF10.80	0,0125	8,74	2,61	1,49	8,45	1,03
2.2BF10.120	0,0125	7,77	2,61	1,32	8,45	0,92
2.2BF12.120	0,0125	8,41	2,61	1,43	8,45	0,995
2.3BF10.100	0,018	9,45	2,61	1,61	9,27	1,02
3.2BF10.100	0,0125	9,59	2,83	1,51	9,16	1,05

Формула (4.7) точніше оцінює результати експериментів, оскільки відношення експериментальних значень f_b до теоретичних є в діапазоні 1,02...1,08, крім пари балок-близнюків 2.2BF10.80, для яких це відношення дорівнює 0,98 (таблиця 4.16).

Таким чином, розрахункові значення граничних напружень зчеплення f_{bd} за використання формули (4.7) можна визначити з рівняння, в якому середнє значення призмової міцності бетону $f_{ctm,prism}$ змінимо на розрахункове значення f_b , прийняте в ДБН [41]:

$$f_{bd} = 0,81\eta_1\eta_2 \left[10,2 + 1,45 \frac{f_{cd}-30,41}{4,34} + 0,97 \frac{\rho_{fv}-0,0125}{0,0055} + 0,16 \frac{\phi-10}{2} + 0,14 \left(\frac{f_{cd}-30,41}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv}-0,0125}{0,0055} \right) \right]. \quad (4.9)$$

За використання формули (4.8) рівняння для визначення f_{bd} набуде вигляду:

$$f_{bd} = 2,25\eta_1\eta_2(1,12 + 25,46\rho_{fv})f_{ctd}, \quad (4.10)$$

де f_{ctd} – розрахункове значення міцності бетону на розтяг.

Значення f_{ctd} визначають за формулою (3.2) ДСТУ [46]:

$$f_{ctd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ctc,0,05}}{\gamma_{ct}}, \quad (4.11)$$

у якій $\alpha_{cc} = 1$, $\gamma_{ct} = 1,5$, а $f_{ctc,0,05}$ визначається за відповідними таблицями Єврокод 2 [52] чи ДБН [41] для конкретного класу бетону.

Результати розрахунків за формулами (4.9) та (4.10) і порівняння з експериментальними даними подано в таблиці 4.19.

Таблиця 4.19 – Результати розрахунку f_{bd} за формулами (4.9) і (4.10) та порівняння дотичних напружень на початку зсуву стрижнів, $\tau_{b0,b,exp}$ з $f_{bd(4.9)}$

Марки зразків	Клас бетону	f_{cd} , МПа	f_{ctd} , МПа	ρ_{fv}	$f_{bd(4.9)}$, МПа	$f_{bd(4.10)}$, МПа	$\tau_{b0,b,exp}$ балкових зразків, МПа	$\frac{\tau_{b0,b,exp}}{f_{bd(4.9)}}$
1.2BF10.100	C20/25	14,5	1	0,0125	3,96	3,24	4,31	1,09
2.1BF10.100	C25/30	17	1,2	0,007	4,20	3,51	4,59	1,09
2.2BF8.80	C25/30	17	1,2	0,0125	4,50	3,88	4,95	1,10
2.2BF10.80	C25/30	17	1,2	0,0125	4,63	3,88	5,28	1,14
2.2BF10.120	C25/30	17	1,2	0,0125	4,63	3,88	5,03	1,09
2.2BF12.120	C25/30	17	1,2	0,0125	4,76	3,88	4,95	1,04
2.3BF10.100	C25/30	17	1,2	0,018	5,07	4,26	5,68	1,12
3.2BF10.100	C30/35	19,5	1,33	0,0125	5,31	4,31	5,90	1,11

З таблиці 4.19 випливає, що розрахункові значення граничних напружень зчеплення f_{bd} , обчислених за модифікованою формулою Єврокоду 2 (4.10), на 16...23% більші за f_{bd} , обчислені за формулою, отриманою за результатами планованого експерименту (4.9). Крім того, потрібно зауважити, що експериментально отримані напруження зчеплення на початковій зсуву $\tau_{b0,b,exp}$ є на 4...14% більшими за f_{bd} , обчисленими за формулою (4.9), а це означає, що за розрахункового значення f_{bd} зсуви навіть не розпочнуться. Таким чином, формулу (4.9), яка враховує не тільки вплив міцності бетону на стиск, а й діаметра стрижнів, можна рекомендувати для розрахунку f_{bd} як точнішу порівняно з формулою (4.10).

Результати розрахунку граничних напружень зчеплення f_{bd} за формулою (4.9) подано в таблиці 4.20.

Таблиця 4.20 – Розрахункові значення граничних напружень зчеплення стрижнів із фібробетоном f_{bd}

Клас бетону	Діаметр стрижневої арматури \varnothing , мм	f_{bd} , МПа				
		Коефіцієнт фібрового армування за об'ємом ρ_{fv}				
		0,007	0,01	0,013	0,016	0,018
C20/25	8	3,46	3,66	3,86	4,06	4,20
	10	3,59	3,79	3,99	4,19	4,33
	12	3,72	3,92	4,12	4,32	4,46
C25/30	8	4,07	4,31	4,54	4,78	4,94
	10	4,20	4,44	4,67	4,91	5,07
	12	4,33	4,56	4,80	5,04	5,20
C30/35	8	4,68	4,95	5,23	5,50	5,68
	10	4,81	5,08	5,36	5,63	5,81
	12	4,94	5,21	5,48	5,76	5,94

Як і для зразків призмового типу, на збільшення граничних напружень зчеплення клас бетону впливає більше, ніж коефіцієнт фібрового армування за об'ємом. Наприклад, із таблиці 4.20 випливає, що за класу бетону C20/25, $\rho_{fv} = 0,007$ і $\varnothing = 10$ мм розрахункове значення граничних напружень $f_{bd} = 3,59$ МПа, а при $\rho_{fv} = 0,018$ $f_{bd} = 4,33$ МПа, тобто в 1,21 разу більше. Підвищення класу бетону з C20/25 до C30/35 за такого ж діаметра стрижнів і за обох відсотків армування збільшує f_{bd} в 1,34 разу.

На основі результатів даних досліджень та з урахуванням вимог Єврокод 2 [52], ДСТУ Б В.2.6-156:2010[46] і ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016[51] пропонуємо алгоритм визначення розрахункової довжини анкерування поздовжньої розтягнутої арматури l_{bd} згинаних фібробетонних елементів:

1. Визначають переріз, відносно якого визначається l_{bd} (наприклад, місце теоретичного обриву стрижнів, які не доводяться до опор, грань опори консольного елемента, в прольоті якого частина стрижнів обривається тощо).

2. За деформаційним методом, сутність якого подана в ДСТУ Б В.2.6-156:2010[46], визначають напруження у стрижнях σ_{sd} визначеного перерізу.

3. За формулою (4.9) визначають розрахункове значення граничних напружень зчеплення стрижнів з фібробетоном.

4. Визначають необхідну базову довжину анкерування $l_{b,rqd}$ стрижнів за формулою норм [46, 52]:

$$l_{b,rqd} = (\phi/4)(\sigma_{sd}/f_{bd}).$$

5. Визначають розрахункову довжину анкерування l_{bd} за формулою норм [46, 52]:

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min},$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – коефіцієнти, які визначають за таблицею 7.2 ДСТУ Б В.2.6-156:2010[46];

$l_{b,min}$ – мінімальна довжина анкерування, яку для анкерування при розтягу беруть з умови:

$$l_{b,min} \geq \max(0,3l_{b,rqd}; 10\phi; 100\text{мм}).$$

Аналізували також формулу (4.5) для визначення максимальних дотичних напружень з заміною у ній середньої призмової міцності бетону $f_{cm,prism}$ на розрахунковий опір бетону f_{cd} . Виявилось, що такі розрахункові напруження є в 1,31...1,63 рази менші за експериментальні значення напружень зчеплення, що відповідають зсуву незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм. Таким чином, цю формулу, на наш погляд, можна рекомендувати для визначення напружень зчеплення у конструкціях із так званою економічною відповідальністю. Формулу (4.3) для визначення дотичних напружень на початку зсуву з заміною $f_{cm,prism}$ на f_{cd} можна рекомендувати для конструкцій, що зазнають, наприклад, дії багаторазово повторних навантажень.

4.4 Висновки до розділу 4

Результати експериментальних досліджень анкерування стрижневої арматури у 32 зразках балкового типу, з яких 16 містили фіброве армування, свідчать про те що:

1. Витягувальні зусилля на початкові зсуву незавантаженого кінця стрижня, за його зсуву 0,1 мм, максимальні витягувальні зусилля з розтягнутої зони фібробетону балок завжди були більшими порівняно з зусиллями за зміщення з бетону розтягнутої зони балок. Наприклад, для фібробетонних балкових зразків 2.2BF10.120 середнє значення витягувальних зусиль $N_{S0,1} = 29,27$ кН, а для бетонних зразків 2.0B10.120 $N_{S0,1} = 23,67$ кН.

2. Підвищення вмісту фібри в одиниці об'єму бетонної суміші сприяє збільшенню згаданих вище витягувальних зусиль у балкових зразках. Наприклад, для зразків 2.1BF10.100 $N_{S0,1} = 24,51$ кН, а для зразків 2.3BF10.100 $N_{S0,1} = 29,67$ кН.

3. Збільшення міцності бетону-матриці фібробетонних балкових зразків призводить до збільшення витягувальних зусиль. Наприклад, для зразків 1.2BF10.100 $N_{S0,1} = 23,01$ кН, а для зразків 3.2BF10.100 $N_{S0,1} = 30,10$ кН.

4. Відношення зусиль, за яких зсув незавантажених кінців стрижнів дорівнював 0,1 мм, до зусиль, за яких почалося зміщення, $\frac{N_{S0,1}}{N_{S0}} = 1,54 \dots 1,83$ (в середньому – 1,69). Відношення максимальних зусиль до зусиль, за яких зсув незавантажених кінців стрижнів дорівнював 0,1 мм. $\frac{N_{Smax}}{N_{S0,1}} = 1,09 \dots 1,19$ (в середньому – 1,17).

5. Дотичні напруження між стрижневою арматурою і фібробетоном зразків балкового типу були меншими порівняно з призматичними зразками. Наприклад, на початкові зсуву стрижнів і за дії максимальних витягувальних зусиль відношення дотичних напружень для зразків балкового типу до дотичних напружень для призматичних зразків було в межах 0,8 – 0,84 (в

середньому – 0,82) , а за зсуву стрижнів на 0,1 мм - 0,76 – 0,83 (в середньому – 0,81).

6. Запропоновано для зразків балкового типу нормальні напруження за витягування стрижнів і дотичні напруження розраховувати за рівняннями регресії, отриманими при випробуваннях зразків призмового типу, праві частини яких рекомендовано множити на середні значення коефіцієнтів (0,81 чи 0,82), які подано в п. 5. Пари рівнянь (4.2) і (4.3), (4.4) і (4.5), (4.6) і (4.7) з урахуванням поданих вище коефіцієнтів можна застосувати для оцінювання середніх значень нормальних напружень у стрижнях і дотичних напружень між стрижнями і фібробетоном на початкові зсуву стрижнів, за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм і за максимальних витягувальних зусиль відповідно.

7. Запропонована формула (4.9) для розрахунку граничних напружень зчеплення стрижнів з фібробетоном балкових елементів та алгоритм розрахунку розрахункової довжини анкерування. Розрахункові значення граничних напружень зчеплення, обчислені за цією формулою, що відповідає зсувові незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм, є на 4...11% більші за експериментальні значення дотичних напружень на початкові зсуву стрижнів.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [23-26].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконані експериментально-теоретичні дослідження анкерування стрижневої арматури класу А500С у фібробетоні, армованому сталевією фіброю зі загнутими кінцями типу HE1050 українського виробництва, дозволили визначити низку особливостей роботи стрижнів за витягування зі зразків призмового і балкового типу.

На основі експериментальних даних, отриманих за використання повного чотирифакторного експерименту (ПФЕ 2⁴), запропоновано методіку розрахунку нормальних напружень завантажуваних кінців стрижнів і дотичних напружень між стрижнями і фібробетоном на початку зсуву стрижнів, за зсуву незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм (умовна границя зчеплення) і за дії максимальних витягувальних зусиль.

За результатами дисертації можна зробити такі висновки:

1. Нормальні напруження завантажуваних кінців стрижнів на початку зсуву стрижнів, за зсуву незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм і за дії максимальних витягувальних зусиль як для зразків призмового типу, так і для балкових зразків залежать від відносної довжини закладання стрижнів у бетон, міцності бетону, вмісту фібрової арматури і діаметра стрижнів. Дотичні напруження між стрижнями і фібробетоном за дії максимальних витягувальних зусиль залежать від тих самих факторів, однак на початку зсуву і за зсуву незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм не залежать від відносної довжини закладання стрижнів у бетон.

2. Нормальні напруження завантажуваних кінців стрижнів і дотичні напруження між стрижнями і фібробетоном як за випробувань призмових, так і балкових зразків завжди були більшими за такі напруження за витягування стрижнів з бетонних зразків. Це перевищення сягало 13...44% залежно від значень факторів експерименту.

3. За випробувань балкових зразків нормальні напруження завантажуваних кінців стрижнів на початку зсуву стрижнів, за зсуву незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм і за дії максимальних витягувальних

зусиль і відповідні дотичні напруження у фібробетонних зразках були меншими порівняно з фібро бетонними призмовими зразками на 16...24%. Дотичні напруження між стрижневою арматурою і фібробетоном зразків балкового типу були меншими порівняно з призматичними зразками.

4. На початкові зсуву стрижнів і за дії максимальних витягувальних зусиль відношення нормальних і дотичних напружень для зразків балкового типу до відповідних напружень для призматичних зразків було в межах 0,8 – 0,84 (в середньому – 0,82) , а за зсуву стрижнів на 0,1 мм - 0,76 – 0,83 (в середньому – 0,81).

5. Рівняння (4.2) і (4.3) для розрахунку нормальних і дотичних напружень на початкові зсуву стрижнів рекомендовано використовувати за проектування конструкцій, які експлуатуються в складних умовах, наприклад, за дії багаторазово повторних навантажень, із заміною в них призмової міцності на розрахункове значення міцності бетону.

6. Рівняння (4.4) і (4.5) для розрахунку максимальних нормальних і дотичних напружень рекомендовано використовувати за проектування конструкцій з економічною відповідальністю. За заміни в них призмової міцності на розрахункове значення міцності бетону розрахункові напруження в 1,31...1,63 рази менші за експериментальні значення напружень зчеплення, що відповідають зсуву незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм.

7. Запропоновано формулу (4.9) для розрахунку граничних напружень зчеплення стрижнів з фібробетоном балкових елементів f_{bd} та алгоритм розрахунку розрахункової довжини анкерування. Розрахункові значення граничних напружень зчеплення, обчислені за цією формулою, що відповідає зсувові незавантажених кінців стрижнів на 0,1 мм, є на 4...11% більшими за експериментальні значення дотичних напружень на початкові зсуву стрижнів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азізов Т. Н., Юрковська Н. Р. Модуль зсуву бетону з урахуванням деформацій пластичності : монографія. Київ, 2016. 108 с.
2. Андрійчук О. В., Бабич В. Є., Поляновська О. Є., Швець І. В. Тріщиностійкість центрально розтягнутих комбіновано-армованих залізобетонних елементів. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2020. Вип. 14. С. 13 – 25.
3. Андрійчук О. В., Кислюк Д. Я., Нінічук М. В. Визначення несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих сталевібробетонних згинальних елементів. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2020. Вип. 13. С. 15 – 23.
4. Андрійчук О. В., Нінічук М. В. Теоретичне визначення характеристик напружено-деформованого стану та несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих згинальних елементів. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2020. Вип. 14. С. 26 – 35.
5. Андрійчук О. В., Нінічук М. В. Тріщиностійкість нерозрізних комбіновано-армованих залізобетонних балок із різними типами армування сталевими фібрами. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2020. Вип. 37. С. 97 – 105.
6. Андрійчук О. В., Швець І. В. Методика експериментального дослідження зчеплення арматури з фібробетоном. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2019. Вип. 12. С. 13 – 20.
7. Астрова Т. И., Овчинникова И. Г. Влияние состава высокопрочногобетона на деформативность сцепления с арматурой периодического профиля. Бетон и железобетон. 1966. № 9. С. 17-19.
8. Бабич Є. М., Бабіч (Поляновська) О. Є., Чапюк О. С. Визначення напружень зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю. *Будівельні конструкції*: зб. наук. пр. НДІБК. 2011. Вип. 74, кн. 1. С. 285–292.

9. Бабич В. Є., Поляновська О. Є., Швець І. В. Вплив дисперсного армування розтягнутої зони залізобетонних балок на їхню тріщиностійкість. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2019. Вип. 37. С. 118–128.
10. Бабич Є.М., Бабич В. Є., Поляновська О. Є. До розрахунку анкерування арматури в згинальних залізобетонних елементах. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. 2014. Вип. 3 (42). Том I. С. 12 – 19.
11. Бабич Є. М., Бабич В. Є., Поляновська О. Є. Зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю та її анкерування в згинальних залізобетонних елементах : монографія. Рівне : Волинські обереги, 2017. 160 с.
12. Бабич Є. М., Бабич В. Є., Поляновська О. Є. Опір арматури витяганню залежно від товщини захисного шару бетону. *Механіка і фізика руйнування матеріалів і будівельних конструкцій*. Львів : Каменяр, 2014. Вип.10. С. 310 – 317.
13. Бабич Є. М., Бабич В. Є., Поляновська О. Є. Удосконалена методика розрахунку анкерування арматури в згинальних залізобетонних елементах: рекомендації. Рівне : НУВГП, 2015. 78 с.
14. Бабич Є. М., Кочкаръов Д. В., Філіпчук С. В. Математична модель зчеплення арматури з високоміцним бетоном. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*: зб. наук. праць. Київ : КНУБА, 2018. Вип. 2. С. 154–161.
15. Бабич Є.М., Чапюк О.С., Вавринюк Б.А. Напружено-деформаційний стан контакту з бетоном арматури серповидного профілю. *Містобудування та територіальне планування*. 2011. Вип. 40. С. 74–82.
16. Бамбура А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.23.01. Харків, 2006. 39 с.
17. Бамбура А. М., Павліков А. М., Колчунов В. І., Кочкаръов Д. В., Яковенко І. А. Практичний посібник із розрахунку залізобетонних конструкцій за

- діючими нормами України (ДБН В.2.6-98:2009) та новими моделями деформування, що розроблені на їхню заміну. Київ : Талком, 2017. 627 с.
18. Барашиков А. Я., Журавський О. Д. Особливості розрахунку плит, підсилених шаром сталевібробетону. *Механіка та фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць*. Львів: Каменярь, 2005. Вип. 6. С. 416–425.
 19. Барашиков А. Я., Журавський О. Д., Цибульник І. О. Експериментальні дослідження міцності та тріщиностійкості плит, підсилених сталевібробетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2001. Вип. 6. С. 255 – 258.
 20. Бенин А. В., Семёнов А. С., Семёнов С. Г., Мельников Б. Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения. *Инженерно-строительный журнал*. 2013. №5(40). С. 86-99.
 21. Бенин А. В., Семенов А. С., Семенов С. Г., Мельников Б. Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения. *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 1(45). С. 23-40.
 22. Білозір В., Височенко А. Визначення необхідної довжини анкерування фібри в бетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2013. № 14. С. 64 – 70.
 23. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Аналіз чинників, що впливають на зчеплення арматури серпоподібного профілю з бетоном і фібробетоном. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві* : зб. наук. праць. Луцьк: ЛНТУ, 2020. Вип. 14. С. 47- 54.
 24. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Анкерування стрижневої арматури класу А500С у сталевібробетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2022. № 23. С.19 – 26.

25. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Зчеплення стрижневої арматури класу А500С зі сталевібробетоном зразків балкового типу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві* : зб. наук. праць. Луцьк : ЛНТУ, 2022. Вип. 18. С. 20-33.
26. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Математична модель зчеплення стрижневої арматури зі сталевібробетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне : НУВГП, 2022. Вип. 41. С. 103- 109.
27. Биби Э. В., Нараянан Р. С. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 2. Проектирование железобетонных конструкций /Науч. ред. пер. Алмазов В. О., Плотников А. И. Москва : МГСУ. 2012. 292 с.
28. Білозір В. В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых сталевібробетонных элементов на фибре из листа : дис... канд. техн. наук:05.23.01/ НИИЖБ. Москва, 1991. 164 с.
29. Бліхарський З. Я., Бобало Т. В., Крамарчук А. П., Ільницький Б. М. Надійність залізобетонних балок із комбінованим армуванням, армованих арматурою класу А1000 та А500С. *Галузеве машинобудування, будівництво: зб. наук. праць ПНТУ*. 2015. Вип. 1. С. 154 – 161.
30. Бліхарський З. Я. Залізобетонні конструкції в агресивному середовищі за дії навантаження та їх підсилення : монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. 296 с.
31. Вахненко П. Ф., Клименко Є. В., Носач О. Б. Використання математичної статистики при дослідженні тріщиностійкості залізобетонних конструкцій. *Коммунальное хозяйство городов: науч.- техн. сб.* 2001. Вып. 33. С.94-98.
32. Верба В. Б. Анкерування сталевібробетону в безавтоклавному пінобетоні за рахунок зчеплення та пластинкових анкерів : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Львів, 2012. 20 с.
33. Верба В. Б., Демчина Б. Г. Контакт пінобетону з арматурою: вивчення явища, його моделювання та стабільність роботи в зоні зчеплення. *Теорія і практика будівництва: вісник НУ "Львівська політехніка"*, 2008. Вип. 627. С. 22–27.

34. Верба В. Б. Розрахунок граничних напружень зчеплення арматури з пінобетоном. *Теорія і практика будівництва: вісник НУ "Львівська політехніка"*. 2013. № 755. С. 37–40.
35. Веселов А. А. Нелинейная теория сцепления арматуры с бетоном и ее приложения : дисс. д-ра техн. наук: 05.23.01. Санкт-Петербург, 2000. 320 с.
36. Висоцька Л. М., Журавський О. Д., Савенко В. І, Кислюк Д. Я. Вплив перетворювача іржі" контраст" на зчеплення арматури з бетоном. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2017. Вип. 7. С. 25-31
37. Георгиев Г. Д. Сцепление арматуры с бетоном при постоянных и переменных нагрузках : дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.23.01. Киев, 1984. 251 с.
38. Гвоздев А. А. Состояние и задачи исследований сцепления арматуры с бетоном. *Бетон и железобетон*. 1968. №12. С.1–4.
39. Гвоздев А. А. Сцепление арматуры с бетоном. *Сцепление арматуры с бетоном* / под ред. А. А. Гвоздева. Москва : Стройиздат, 1971. С.3-5.
40. Горобець А. М., Журавський О. Д. Експериментально-теоретичні дослідження втрат попереднього напруження в сталевібробетонних конструкціях при одновісному та двовісному обтиску. *Теорія і практика будівництва: вісник НУ "Львівська політехніка"*. 2007. Вип. 600. С. 68 – 74.
41. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: [Чинний від 2011-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71с. (Державні будівельні норми України).
42. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту : навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.
43. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Проектування складів бетонів : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 353 с.
44. Демчина Б. Г., Верба В. Б., Демчина Х. Б. Експериментальні дослідження зчеплення арматури з пінобетоном. *Теорія і практика будівництва: вісник НУ "Львівська політехніка"*. 2005. Вип. 545. С. 41 – 45.

45. Дмитренко Є. А. Розрахункова модель зчеплення у залізобетоні за наявністю дискретних тріщин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук. Київ, 2017. 20 с.
46. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: [чинний від 2011-06-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 116 с. (Національний стандарт України)
47. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с. (Національний стандарт України).
48. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Бетони. Правила підбору складу. На заміну ГОСТ 27006-86; чинні 2010-09-01. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 14 с.
49. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 17с. (Національний стандарт України).
50. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Бетони правила контролю міцності. Будівельні матеріали. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 23с. (Національний стандарт України).
51. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 35 с.
52. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Ч. 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1992-1-1: 2004, IDT): ДСТУ-Н Б EN1992-1-1: 2010. Введ. в дію 01.07.2013. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 118 с.
53. Журавський О. Д. Міцність, тріщиностійкість та деформації залізобетонних плит при складних навантаженнях : дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.23.01. Київ, 2021. 327 с.
54. Журавський О. Д., Горобець А. М. Моделювання роботи попередньо-напружених сталевібробетонних плит при поперечному згині. *Містобудування та територіальне планування*. 2016. Вип. 61. С. 209 – 215.

55. Журавський О., Ромашко-Майструк О. Експериментальні дослідження багаторівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах. *Будівельні конструкції : теорія і практика*. 2019. Вип. 4. С. 28–38.
56. Журавський О. Д., Цибульник І. О. Дослідження плит, підсилених сталевібробетоном. *Будівельні конструкції*. 2001. №54. С. 268 – 270.
57. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. Москва : Стройиздат, 1996. 416 с.
58. Карпенко Н. И., Судаков Г. Н., Лейтес Е. С. Моделирование механического взаимодействия арматурного стержня с бетоном, учитывающее напряженно-деформированное состояние контактной зоны. *Поведение бетона и элементов железобетонных конструкций при воздействиях различной длительности*. Москва : Стройиздат, 1980. С.133–156.
59. Карпюк В. М. Розрахункові моделі силового опору прогінних залізобетонних конструкцій у загальному випадку напруженого стану : монографія. Одеса : ОДАБА, 2014. 352 с.
60. Кваша В. Г. Анкерующие свойства арматуры периодического профиля класса А-III, выпускаемой по ТУ14-2-636-85. *Пути снижения материалоемкости и стоимости в строительстве и при реконструкции зданий* : тез. докл. зональной конф., 22 – 23 октября 1990 г. Пенза, 1990. С. 50.
61. Клименко Є. В., Полянський К. В. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних балок. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. 76. С. 24-30.
62. Клімов Ю. А., Боденчук П. С., Солдатченко О. С. Дослідження зчеплення арматури з підвищеною корозійною стійкістю з бетоном. *Містобудування та територіальне планування*. 2011. Вип. 40. С. 454 – 460.
63. Климов Ю. А., Солдатченко О. С., Орешкин Д. А. Экспериментальные исследования сцепления композитной неметаллической арматуры с бетоном. URL: http://www.ekibar.org/files/frp_rebar_test_adhesion_concrete.pdf

64. Колчунов В. И., Яковенко И. А., Дмитренко Е. А. Аналитическая модель сцепления и нелинейная податливость арматурных связей при раскрытии дискретных трещин в железобетонных конструкциях. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2016. Вип. 32. С. 183 – 196.
65. Колчунов В. И., Яковенко И. А., Дмитренко Е. А. Конечно-элементные плоские модели нелинейной задачи сцепления арматуры с бетоном, их сравнение и анализ. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 165. С. 241 – 260.
66. Колчунов В. И., Яковенко И. А., Дмитренко Е. А. Основные результаты экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при выдергивании и вдавливании деформационным воздействием с учетом ниспадающей ветви деформирования. *Вісник Кременчуцького національного ун-ту ім. Михайла Остроградського*. 2016. Вип. 5(100). С. 115 – 124.
67. Кочкаръов Д. В. Про середні напруги зчеплення арматури з бетоном. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. 2014. Вип. 1(65). С. 176–184.
68. Лысенко Е. Ф., Гетун Г. В. Проектирование сталефибробетонных конструкций : учеб. пособие. Киев : УМК ВО, 1989. 184 с.
69. Лобзін М. В., Гладишев Д. Г., Шиндер В. К. Дослідження впливу порушення зчеплення арматури з бетоном у приопорних ділянках залізобетонних ребристих плит покриття на їх несучу здатність. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*. 2013. № 755. С. 237-241.
70. Лучко Й. Й., Левчич В. В. Некоторые аспекты теории сцепления арматуры с бетоном в изгибаемых элементах: Физико-механический ин-т НАН Украины, 1990. 37 с. (Препринт. НАН Украины, Физ.-мех. ин-т; №175.)
71. Мадатян С. А., Дегтярев В. В. Прочность изгибаемых элементов, армированных стержнями класса А500С, соединенными внахлестку без сварки. *Бетон и железобетон*. 2002. №1. С.10-13.

72. Мазурак Р. Огляд досліджень анкерування арматурних стрижнів у сталевібробетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2021. № 22. С. 47 – 53.
73. Мазурак Р. А., Цап О. Аналіз методик розрахунку необхідної довжини анкерування стрижневої арматури в бетоні та сталевібробетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2018. № 19. С. 49-52.
74. Мельник І. В., Кваша В. Г. Про експлуатаційну надійність попередньо напружених залізобетонних конструкцій, армованих стержнями серпоподібного профілю. *Будівельні конструкції* : зб. наук. праць НДІБК. 1999. Вип. 51. С. 206-211
75. Моргун В. Н., Курочка П. Н., Богатина А. Ю., Моргун Л. В., Кадомцева Е.Э. Вопросы сцепления стержневой арматуры с бетоном и фибробетоном. *Строительные материалы*. 2014. №8. С. 56 – 59.
76. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. Стройиздат, 1974. 233с.
77. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / под ред. А. А. Гвоздева. Москва : Стройиздат, 1978. 204 с.
78. Оатул А. А. Критический обзор некоторых исследований сцепления арматуры с бетоном. *Исследования по бетону и железобетону* : сб. научн. тр. Челябинск, 1989. С. 3–7.
79. Павліков А. М., Федоров Д. Ф. Ширина розкриття нормальних тріщин у залізобетонних балках при косому згинанні. *Галузеве машинобудування, будівництво* : зб. наук. праць ПНТУ. 2012. Вип. 5. С. 116-121.
80. Поляновська О. Є. Зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю та удосконалення розрахунку її анкерування в згинальних залізобетонних елементах : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.23.01. Львів, 2015. 21 с.

81. Прокопович А.А. Сопротивление изгибу железобетонных конструкций с различными условиями сцепления продольной арматуры с бетоном. Самара : Сенсоры. Модули. Системы, 2000. 296 с.
82. Рабинович Ф.Н. Дисперсноармированные бетоны. Москва : Стройиздат, 1989. 176с.
83. Ромашко-Майструк О. В. Моделювання зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2020. Вип. 190. С. 35-41.
84. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне : О. Зень, 2016. 424 с.
85. Ромашко О. В., Ромашко В. М., Журавський О. Д. Узагальнена модель зчеплення арматури з бетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. праць. 2019. Вип. 37. С. 214– 221.
86. Ромашко О. В., Ромашко В. М. Щодо оцінювання зчеплення арматури з бетоном. *Зб. наук. праць. УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 179. С. 92–99.
87. Стечишин М. С., Саницький М. А., Позняк О. Р., Бігун Г. Г. Фіброармовані самоущільнювальні бетони з високим вмістом золи виносення. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Серія: Теорія і практика будівництва : зб. наук. праць. 2015. № 823. С. 308–314.
88. Салійчук Л.В. Експериментальні дослідження та теоретичне обґрунтування міцності анкерування в бетон вклеєних стержневих анкерів при зсуві. *Будівельні конструкції* : зб. наук. пр. Київ : НДІБК, 2011. №. 74. С.494-506.
89. Салійчук Л.В. Експериментально-теоретичне обґрунтування взаємодії групових анкерів з оточуючим бетоном під час зсуву. *Вісник Національного університету „Львівська політехніка". Теорія та практика будівництва*. Львів : Видавництво НУ „ЛП", 2013. №755. С.370 -379.
90. Самошкин А. С. Исследование взаимодействия арматуры с бетоном расчетно-экспериментальными методами : дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.23.01. Новосибирск, 2017. 119 с.
91. . Семко А. В. Образование и раскрытие трещин, нормальных к продольной оси косоизгибаемых железобетонных элементов таврового и Г-образного

- сечения : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.23.01. Полтава, 1988. 184 с.
92. Семченков А. С., Залесов А. С., Мешков В. З., Квасников А. А. Характер сцепления с бетоном стержневой арматуры различных профилей. *Бетон и железобетон*. 2007. № 5. С. 2 – 7.
93. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Госстрой СССР. Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 80 с.
94. Тихонов И. Н., Мешков В. З., Судаков Г. Н. Эффективная стержневая арматура для железобетонных конструкций. *Бетон и железобетон*. 2004. №5. С.18–23.
95. Тихонов И. Н., Саврасов И. П. Экспериментальные исследования предельных состояний железобетонных балок с арматурой класса прочности 500 МПа. *Жилищное строительство*. 2010. №8. С. 31–38.
96. Холмянский М. М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность. Москва : Стройиздат, 1997. 576 с.
97. Холмянский М. М. Контакт арматуры с бетоном. Москва : Стройиздат, 1981. 184 с.
98. Хотько А.А. Сцепление с бетоном и анкеровка ненапрягаемой арматуры с различными видами периодического профиля : дис. канд. техн. наук: 05.23.01.Новополоцк, 2006.137с.
99. Худик Ю. Т., Рыбалка Е. М., Климов Ю. А. Производство и применение арматурного проката класса А500С. *Будівельні конструкції*: зб. наук. праць НДІБК. 2003. Вип. 59, кн.1. С. 22-25.
100. Цыба О. О. Трещиностойкость и деформативность растянутого бетона с ненапрягаемой и напрягаемой стержневой арматурой, имеющей различную относительную площадь смятия поперечных ребер: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 2011. 24 с.
101. Чапук О. Зчеплення арматурних стержнів різних діаметрів класу А500С з бетоном. *Вісник Тернопільського національного технічного*

- університету: Сер. *Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки*. 2013. №2. С. 156 – 163.
102. Чапюк О. С. Зчеплення бетону з арматурним прокатом серповидного профілю при короткочасних одноразових і повторних навантаженнях: автореф. дис... канд. техн. наук. Львів, 2010. 20 с.
103. Чапюк О.С., Гришкова А.В. Порівняльний аналіз зчеплення сталеві арматури серповидного профілю з важким бетоном за призмовим та балковим методом випробувань. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2014. Вип. 29. С. 391–399.
104. Чапюк О. С., Гришкова А. В. Характеристика напружено-деформованого стану зчеплення з бетоном арматури серповидного профілю. *Містобудування та територіальне планування*. 2014. Вип. 67. С. 461 – 467.
105. Шмуклер В. С., Климов Ю. А., Буряк Н. П. Каркасные системы облегченного типа. Харьков : Золотые страницы, 2008. 336 с.
106. Achillides Z. Bondbehaviour of FRP bars in concrete: PhD Thesis. University of Sheffield, 1998. 355 p.
107. Avak R., Wille F. Bond Behaviour of Steel Wire Ropes Embedded in Concrete. Proc. *Bond in Concrete – from research to standards* / Balázs G. Etal. Budapest: University of Technology and Economics. 2002. P. 300-307.
108. Bandelt M. J., Billington S. L. Bond behavior of steel reinforcement in high-performance fiber-reinforced cementitious composite flexural members. *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49. P. 71 – 86.
109. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 1995. Jg. 140. Nr. 2. S. 38 – 53.
110. Cairns J., Jones K. The splitting forces generated by bond. *Magazine of Concrete Research*. 1995. Vol. 47, No. 171. P. 153-165.
111. Carvalho E. P., Miranda M. P., Fernandes D. S. G., Alves G. V. Comparison of test methodologies to evaluate steel-concrete bond strength of thin reinforcing bar. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 183. P. 243–252.

112. Chao S.-H., Naaman A. E., Parra-Montesinos G. J. Bond Behavior of Reinforcing Bars in Tensile Strain-Hardening Fiber-Reinforced Cement Composites. *ACI Structural Journal*. 2009. V. 106, No. 6. P. 897 – 906.
113. Chan Simon H. C. Bond and cracking of reinforced concrete : PhD Thesis . Cardiff University, 2012. 171 p.
114. Chu S.H., Kwan A.K.H. A new bond model for reinforcing bars in steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 104. 103405. 12p.
115. Danielle S. G. Fernandes, Rogério C. de Azevedo, Eliene P. Carvalho, Marcela P. Miranda, A Review on the Study of Bond Behavior between Reinforcement Thin Bars and Concrete. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2017. Vol. 6 (70). P. 125 – 130.
116. Diab A. M., Elyamany H. E., Hussein M. A., Al Ashy H. M. Bond behavior and assessment of design ultimate bond stress of normal and high strength concrete. *Alexandria Engineering Journal*. 2014. Vol. 53. P. 355-371.
117. DIN 1045-1: 2008-08. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. [Ausgabedatum: August 2008]. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2008. 178 s. (Німецький стандарт).
118. Emperger F. V. Neuere amerikanische Versuche zur Bestimmung der Haftfestigkeit zwischen Beton und Eisen. *Beton und Eisen*. 1915. P. 73-75, 95-97, 113-115, 134-137.
119. Garcia-Taengua E., Martí-Vargas J. R., Serna P. Bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. № 105. P. 275 – 284.
120. Garcia-Taengua E., Martí-Vargas J. R., Serna P. Splitting of concrete cover in steel fiber reinforced concrete: Semi-empirical modeling and minimum confinement requirements. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66. P. 743 – 751.

121. Garcia-Taengua E., Marti-Vargas J. R., Serna-Ros P. Statistical approach to effect of factors involved in bond performance of steel fiber-reinforced concrete. *ACI Structural Journal*. 2011. Vol. 108(4). P. 461– 468.
122. Hadi M. N. S. Bond of high strength concrete with high strength reinforcing steel. *Open Civil Engineering Journal*. 2008. Vol. 2. P. 143-147.
123. Harajli M. H. Bond Stress–Slip Model for Steel Bars in Unconfined or Steel, FRC, or FRP Confined Concrete under Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2009. Vol.135. P. 509-518.
124. Harajli M. H. Effect of confinement using steel, FRC, or FRP on the bond stress-slip response of steel bars under cyclic loading. *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39. P. 621–634.
125. Harajli M. H., Hamad B., Karam K. Bond-slip Response of Reinforcing Bars Embedded in Plain and Fiber Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2002. Vol. 14. P. 503 – 511.
126. Holschemacher K., Weiße D. Bond of Reinforcement in Fibre Reinforced Concrete. *Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes*. 20-22 September 2004. Varenna, Italy: RILEM Publications SARL, 2004. P. 349 – 358.
127. Kaczmarczyk G.P., Kinasz R., Bilozir V., Bidenko I. Application of X-ray Computed Tomography to Verify Bond Failures Mechanism of Fiber-Reinforced Fine-Grain Concrete. *Materials*. 2022. 15(6), 2193.
128. Khalfallah S. and Ouchenane M. A Numerical Simulation of Bond for Pull Out Tests: The Direct Problem. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 2007. Vol. 8, No. 5. P. 491-505
129. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Gripping of Anchor Fiber of Ukrainian Production with Fine- Grain Concrete. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. Pap.* 2021, 1203, 022050.
130. Kwak H. G., Filippou F. C. Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic loads: Report No. UCB/SEMM-90/14. California : Department of Civil Engineering University of California Berkeley, 1990. 120 p.

131. Kwak H. G., Kim S. P. Bond-slip behavior under monotonic uniaxial loads. *Engineering Structures*. 2001. Vol. 23, No. 3. P. 298-309.
132. Lorenzis L., Rizzo A., La Tegola A. A modified pullout test for bond of near surfacemounted FRP rods in concrete. *Composites. Part B: Engineering*. 2002. Vol. 33.No. 8. P. 589-603.
133. Mahran U. M. Theoretical Study for Bond Between Reinforcement Steel and Concrete. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*. 2013. Vol. 12, No 1. P. 93-102.
134. Máté Tóth, Boglárka Bokor, Akanshu Sharma. Anchorage in steel fiber reinforced concrete—concept, experimental evidence and design recommendations for concrete cone and concrete edge breakout failure modes. *Engineering Structures*. Vol. 181, 15 February 2019, P. 60-75.
135. Michal M., Keuser M. Bond of steel and concrete under high loading rates. *Proc. of the 9th Inter. Conf. on Structural Dynamics EURODYN 2014*, 30 June - 2 July 2014. Porto, 2014. P. 3491-3496.
136. Rashedul Kabir Md. Bond stress behavior between concrete and steel rebar: Critical investigation of pull-out test via Finite Element Modeling. *International Journal of Civil and Structural Engineering*. 2014. Vol. 5, No1. P. 80-90.
137. Rehm G. The basic principles of the bond between steel and concrete: Translation №134. Cement and concrete association. London, 1968. 66 p.
138. RILEM/CEB/FIP RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983.TC R. RC 5 Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test, 1982.*RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials*. New York, USA: E & FN SPON, 1978.P. 213–217.
139. RILEM Standard RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983.*RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials*. New York, USA: E & FN SPON, 1994. P. 218–220.
140. Ruiz M. R., Hars E., Muttoni A. Bond mechanics in structural concrete. *Theoretical model and experimental results*. Lausanne: IS-BETON, EPFL, 2005. 75 p.

141. . Sharaky I. A. A. A study of the bond and flexural behaviour of reinforced concrete elements strengthened with near surface mounted (NSM) FRP reinforcement: PhD Thesis. Universitate de Girona, 2013. 264 p.
142. Zhang X., Zhang W., Cao C., Xu F., Yang C. Positive effects of aligned steel fiber on bond behavior between steel rebar and concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2020. Vol. 114. 103828. 11 p.

Додаток А.

ЛЬВІВСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ



LVIV
NATIONAL
ENVIRONMENTAL
UNIVERSITY

вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни,
Львівський район, Львівська область, 80381,
Україна
тел.: (032)22-42-335, факс: (032)22-42-919,
e-mail: rectorat@lnup.edu.ua

1, Volodymyra Velykoho Str., Dubliany,
Lviv district, Lviv region, 80381
Ukraine
phone: (032)22-42-335, fax: (032)22-42-919,
e-mail: rectorat@lnup.edu.ua

18.01.2023р. № 01-28-03-46.1
На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Мазурака Ростислава Андрійовича
«АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ У ФІБРОБЕТОНІ»
на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань
19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво
та цивільна інженерія»

Результати дисертаційної роботи Мазурака Ростислава Андрійовича на тему «Анкерування стрижневої арматури у фібробетоні» використані в навчальному процесі на кафедрі будівельних конструкцій Львівського національного університету природокористування при вивченні дисципліни «Проектування спеціальних конструкцій: залізобетонні конструкції». Зокрема, при розробці навчальних матеріалів з цієї дисципліни використані напрацювання щодо застосування алгоритму визначення розрахункової довжини анкерування стрижневої арматури в сталеві фібробетоні, що дає можливість ефективно використовувати арматуру А500С.

Довідка видана для пред'явлення у спеціалізовану вчену раду, в якій проводитиметься захист дисертації Мазурака Р. А.

Проректор з наукової роботи
доктор економічних наук, професор

Завідувач кафедри
будівельних конструкцій,
кандидат технічних наук, доцент



(Handwritten signatures in blue ink)

Ігор ЯЦІВ

Олександр ГНАТЮК

Продовження додатку А

Затверджую

Директор, головний архітектор
проектів проектно-будівельної

компанії VR-GROUP

Іван Капустей

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати дисертаційної роботи Мазурака Ростислава Андрійовича за темою «АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ У ФІБРОБЕТОНІ» були використані при розрахунку несучих конструкцій залізобетонних перекриттів на складських будівлях об'єкту «Порт» в с. Пасіки – Зубрицькі Давидівської сільської ради Львівської області. (2022р.)

Головний інженер конструктор

Богдан Когут



ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати дисертаційної роботи Мазурака Ростислава Андрійовича за темою «АНКЕРУВАННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ У ФІБРОБЕТОНІ» були використані при розрахунку і зведенні несучих конструкцій залізобетонних перекриттів будівництва Багатоквартирного житлового будинку з вбудованими нежитловими приміщеннями підземним гаражем на вул. Угорській, 14 у м. Львові (№12608-20ПР – 2022р)

Генеральний директор
ТЗОВ «ТВД»



Василь Удут

Додаток Б.

Список опублікованих праць за темою дисертації

У наукових фахових виданнях України:

1. Мазурак Р. А., Цап О. М Аналіз методик розрахунку необхідної довжини анкерування стрижневої арматури в бетоні та сталевібробетоні. Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2018 № 19. С. 49-52
2. Білозір В. В. Мазурак Р.А. Аналіз чинників, що впливають на зчеплення арматури серповидного профілю з бетоном і фібробетоном. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві Випуск 14, 2020 ЛНТУ Луцьк. С.47- 54.
3. Мазурак Р. Огляд досліджень анкерування арматурних стрижнів у сталевібробетоні. Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. 2021. № 22. С. 47 – 53.
4. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Математична модель зчеплення стрижневої арматури зі сталевібробетоном. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди.2022. Вип. 41. С. 103- 109.
5. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Анкерування стрижневої арматури класу А500С у сталевібробетоні. Вісник Львівського національного університету природокористування. Сер. Архітектура та будівництво. 2022. № 23. С. 19-26.
6. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Зчеплення стрижневої арматури класу А500С зі сталевібробетоном зразків балкового типу. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві Випуск 18, 2022 ЛНТУ Луцьк. С. 22 – 33.

Додаток В.

Відомості про апробацію результатів дисертації

У наукових виданнях матеріалів конференції:

1. Білозір Віт., Мазурак Р., Подгорецький А. Утворення та розкриття тріщин у перерізах, нормальних до поздовжньої осі комбіновано армованих сталевібробетонних балок. *Міжнародна науково-практична конференція «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села»* (Дубляни – Львів, 15-17 травня 2019 р.) С.93-96
2. Білозір Віт. Мазурак Р. Обґрунтування програми експериментальних досліджень зчеплення арматурних стержнів з фібробетоном. *XX Міжнародний науково-практичний форум «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій»* (м. Львів, ЛНАУ, 17-19 вересня 2019 року) С.365-367.
3. Мазурак Р. Аналітичний огляд зарубіжних досліджень зчеплення стрижневої арматури серповидного профілю зі сталевбетоном. *Міжнародна науково-практична конференція «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села»* (Дубляни – Львів 24-25 червня 2021 р.) С.46-48.
4. Білозір Віт., Мазурак Р. Анкерування стрижневої арматури класу А500С у сталевібробетоні. *Міжнародна науково-практична конференція «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села»* (м. Львів, ЛНАУ, 16-17 червня 2022 року) С.15-17.
5. Білозір Віт., Мазурак Р. Математична модель зчеплення стрижневої арматури зі сталевібробетоном на початкові зсуву. *XXIII Міжнародний науково-практичний форум «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій»* (м. Львів, ЛНУП, 4-6 жовтня 2022 року) С. 527-530.