

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

**Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою
Кафедра будівництва та цивільної інженерії**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи
на тему: **Методи дослідження тріщиностійкості фіброармованих
бетонів**

Виконав: **Артем БРАЖНИКОВ**

студент групи 601 БТ спеціальності 192
«Будівництво та цивільна інженерія» за ОП
«Технології будівельних конструкцій, виробів і
матеріалів»

Керівник **Расул АХМЕДНАБИЄВ**

Завідувач кафедри **Олександр СЕМКО**

Рецензент **Андрій ЯЛОВЕГІН**

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 4 |
| РОЗДІЛ 1 Огляд літератури..... | 6 |
| 1.1 Сталефібробетон як матеріал для будівельних конструкцій..... | 6 |
| 1.2 Міцнісні характеристики сталефібробетону..... | 13 |
| 1.3 Деформативність і тріщиностійкість сталефібробетону | 22 |
| 1.4 Застосування сталефібробетону в конструкціях | 28 |
| РОЗДІЛ 2 Мета і теоретичне обґрунтування роботи | 34 |
| РОЗДІЛ 3 Методика дослідження..... | 39 |
| РОЗДІЛ 4 Характеристика вихідних матеріалів..... | 48 |
| РОЗДІЛ 5 Результати дослідження та їх пояснення..... | 52 |
| 5.1 Програма обробки результатів | 52 |
| 5.2 Міцність композитів при стиску | 52 |
| 5.3 Визначення середньої густини першої серії зразків | 60 |
| 5.4 Міцність композитів при згині | 67 |
| 5.6 Результати випробувань тріщиностійкості..... | 74 |
| 5.7 Загальні висновки..... | 75 |
| РОЗДІЛ 6 Охорона праці та безпека життєдіяльності..... | 77 |
| 6.1 Загальні положення | 77 |
| 6.2 Вимоги до технологічних процесів | 80 |
| 6.3 Вимоги до вихідних матеріалів | 82 |
| 6.4 Вимоги охорони праці при роботі з бетонозмішувачем..... | 83 |
| 6.4.1 Загальні положення..... | 83 |
| 6.4.2 Вимоги безпеки перед початком роботи..... | 85 |
| 6.4.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи..... | 86 |
| 6.4.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи..... | 87 |
| РОЗДІЛ 7 Висновки та рекомендації..... | 65 |
| ЛІТЕРАТУРА..... | 88 |

ВСТУП

На сьогодні більша частина будівельних робіт ведеться із застосуванням бетону. Незважаючи на ряд незаперечних переваг і його широке застосування, неармовані бетони характеризуються низькою ударною міцністю, низьким опором на розрив, і утворенням усадочних тріщин при твердінні. Все це призводить до відносно невисокої довговічності виробів. Традиційно ці проблеми вирішуються вторинним армуванням, яке в конструкційному бетоні здійснюється використанням сталевих арматур, а в перекриттях - металевих сітки. Крім того, останнім часом набувають популярності спроби застосування дисперсного армування бетонної матриці за допомогою поліпропіленових, скляних, базальтових і металевих волокон. Дані способи дозволяють виготовляти конструкції складної конфігурації, вирішуючи проблеми морозостійкості виробів, зменшуючи їх загальну вагу. При певному дозуванні волокно замінює вторинне армування і забезпечує пластичність бетону, зменшуючи обсяги застосування конструктивної сталевих арматур. Дисперсне армування підвищує пластичність бетонної суміші і зменшує утворення усадочних тріщин[1].

На сьогоднішній день існує досить великий різновид будівельних волокон. Кожний із них мають свої особливості використання, відрізняються методом введення в заміс, а також мають ряд модифікацій (структура поверхні, товщина і довжина окремого волокна, діаметр і т.д.). Ефективність фіброармування залежить як від вмісту волокон в матриці, так і від їх міцності, геометрії, рівномірності розподілення та інших параметрів. Кількість волокон, що необхідні для повної передачі розтягуючих напружень в тріщині після її виникнення, можливо визначити за допомогою концепції критичного вмісту волокон. При виробництві бетону, як правило, застосовують вміст волокон нижче критичного, при цьому основний акцент робиться на зменшенні крихкості бетону за рахунок поступового витягування фібри з матриці. В процесі виготовлення конструкцій з фібробетону утворюються структури з різною

орієнтацією волокон в бетоні і внаслідок цього проявляються його відмінності в несучій здатності. Одним з актуальних в застосуванні видом волокна являється сталева фібра.

Ефективність застосування фібробетону в будівельних конструкціях досягається за рахунок зниження трудовитрат на арматурні роботи, суміщення технологічних операцій на приготування, армування, укладання та ущільнення фібробетонної суміші, продовження терміну експлуатації конструкцій і зниження витрат на різні види поточного ремонту.

Застосування його замість залізобетону дозволяє знизити в 1,5 – 2 рази матеріаломісткість конструкцій і на 25 – 40 % їх вартість при одночасному підвищенні експлуатаційних властивостей, довговічності, температуростійкості та водонепроникності[2].

РОЗДІЛ 1

ФІБРОБЕТОН ЯК МАТЕРІАЛ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ, СТАН ЙОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ.

1.1 Фібробетон як матеріал для будівельних конструкцій

Про застосування різного виду волокон або фібр для покращення експлуатаційних властивостей будівельних матеріалів відомо з давнини: різана солома для сирої цегли, кінський та інший волос для штукатурних робіт, пізніше – азбестові волокна для азбофанери. На даний час використовують в якості фібр скловолокно, вуглецеве волокно, різного роду синтетичні волокна та сталеві фібри [3,4,5].

Ідея про підсилення звичайного бетону рівномірно розподіленими по об'єму сталевими відрізками дроту (фібрами) виникла більше ніж 100 років тому. У 1874 році Д. Берард отримав перший патент в цій області. Першим дослідником властивостей фібробетону був російський інженер В.П.Некрасов. На початку ХХ століття ним було виготовлено перші фібробетонні конструкції, а також зроблено низку експериментально-теоретичних висновків, проте вони не отримали подальшого розвитку. Тільки у 70-их роках минулого століття дослідження Д.П.Ромуальді, Г.Б.Батсона, і Д.А. Манделя знову привернули увагу світових вчених до сталевібробетону, що послужило поштовхом для нових досліджень. За останні три десятиріччя вченими в багатьох країнах світу отримано результати, якими підтверджено якісно кращі показники фібробетону у порівнянні зі звичайним бетоном[4].

Фібробетон – це композитний матеріал, що складається з матриці – дрібнозернистого бетону та хаотично розташованих в ній коротких відрізків сталевих дроту – фібр.

Ефективність застосування волокон в бетоні залежить від їх вмісту та відстані між окремими волокнами. Дисперсне армування звичайно досить

ефективно призупиняє розвиток волосяних тріщин лише при відстані між різноманітними волокнами не більше 10 мм, тому застосування в бетоні крупного заповнювача, що не дозволяє розташувати дисперсні волокна достатньо близько одні до одних, знижує ефективність подібного армування.

Ефективність впливу різних видів волокон на властивості бетону залежить від співвідношення модулів пружності армуючих волокон та бетону. При виконанні умови $E_v/E_\sigma > 1$ можливе отримання фібробетону з підвищеною міцністю на розтяг та тріщиностійкістю. При $E_v/E_\sigma < 1$ підвищується ударна міцність та опір матеріалу стираності.

Фібру вводять в бетонну суміш зазвичай в кількості 1-2,5% по об'єму бетону (3-9% по масі, що складає 70-200 кг фібри на 1 м³ суміші). В цьому випадку підвищується міцність бетону на розтяг на 10-30%, його межа втомленості і зносостійкість.

При армуванні бетону дисперсними волокнами його руйнування відбувається не зразу, а поступово. На початку утворюються мікротріщини, число яких поступово збільшується. Утворення суцільної тріщини відбувається при більш значній величині деформацій, ніж у звичайному бетоні. Фібра ніби підтримує бетон, допомагає йому опиратися розтягуючим напруженням. При дії на бетон механічних чи теплових ударів (пожежа) бетон тривалий час забезпечує захист арматури або більш глибоких шарів та не викришується з поверхні. Подібний характер поведінки бетону при навантаженні сприяє підвищенню надійності роботи дисперсно-армованих виробів в особливих випадках експлуатації [6].

Як матрицю найчастіше використовують дрібнозернистий бетон з густиною не менше 1800 кг/м³ на цементному в'язучому, який якісно відрізняється від звичайних бетонів відсутністю крупного заповнювача, що обумовлює більш однорідну його структуру, а також підвищеним вмістом цементу та більш низьким водоцементним відношенням.

Для приготування такої матриці використовують портландцемент марки не нижче за М400. Його кількість залежить від водоцементного відношення та способу приготування і укладання бетонної суміші. Як правило, витрати цементу складають 400...500 кг/м³. Оптимальне співвідношення Ц:П приймають 1:3 (за масою). Як заповнювач використовують пісок або дрібну фракцію щебню. В окремих випадках може використовуватись важкий бетон з крупним заповнювачем (величина зерен до 10 ... 15 мм) [7].

Водоцементне відношення В/Ц матриці приймають від 0,3 до 0,6. Воно підвищується зі збільшенням об'ємного проценту армування фібрами. Оптимальне В/Ц знаходиться в межах 0,45...0,55.

Однією з проблем виготовлення фібробетону є відсутність масового виробництва в країні дискретної фібрової арматури та її висока вартість. Недостатній об'єм виробництва фібри змушує будівельні організації закупляти дорогий матеріал у вітчизняних або зарубіжних фірмах. При цьому купована фібра значимо підвищує ціну на будівельні вироби.

Актуальним напрямком у цьому зв'язку є використання в якості дискретної арматури тросів і канатів, що відпрацювали свій виробничий ресурс, вантажопідіймальних механізмів шахт, кранового устаткування, виробів для різного вантажопід'ємного оснащення, дорожніх машин; залишків щіткового виробництва і щіткових волокон, а також виготовлення фібри з відходів виробництва сталевих прокатного листа.

Процес використання вторинної сировини в якості вихідних компонентів для виготовлення фібробетона і виробів з нього не тільки зменшує їх вартість, а й позитивно впливає на екологію, шляхом зниження ступеня забрудненості і захащеності навколишнього природного середовища від виробничої діяльності кар'єрів, заводів будіндустрії, металургійних та інших виробництв.

На ефективність фібробетону значно впливає вид та спосіб виготовлення фібр, їх геометричні характеристики та орієнтація в бетонній матриці. Відомо [7,8,9], що фібру можуть виготовлятися з маловуглецевого сталевих дроту,

гладкого або періодичного профілю діаметром 0,2...1,5мм з тонколистової сталі товщиною від 0,5 до 1мм та з дроту діаметром 0,2...1,5 мм відпрацьованих канатів, надійно очищених від бруду та змащувальних матеріалів. Поперечний переріз сталевих фібр може бути круглим (з дроту), прямокутним (з листової сталі) або іншої форми (фібри з розплавленого металу). Найефективнішими є фібри діаметром 0,25...0,5 мм, а також плоскі завтовшки 0,15...0,4 мм і завширшки 0,25...0,9 мм. Відношення довжини l_f до еквівалентного круглого перерізу d_f фібр рекомендується в межах 25...160. Найчастіше використовують фібри з $l_f/d_f = 50...100$, а за умови максимальної міцності та в'язкості при згині оптимальне відношення складає $l_f/d_f = 75$ [10,11].

На вартість фібр і на техніко-економічні показники фібробетону в цілому найбільше впливає спосіб виготовлення фібр. Відомі такі способи виготовлення фібр: з дроту, нарізаного та відпрофільованого на спеціальних верстатах; зі сталеві смуги; фрезеруванням із сталевого зливка; витяжкою волокон з розплавленої сталі; з відпрацьованих канатів [4,9,12].

За кордоном найбільш поширеними є три типи сталевих фібр: прямокутного поперечного перерізу з листової сталі, виготовлені з розплавленого, а також з незагартованого сталевого гладкого або періодичного дроту. Фібри можуть мати відігнуті кінці, які збільшують анкерування фібр в бетоні, а це в свою чергу збільшує міцність фібробетону при згині на 30% [4,11].

Фібробетон має ряд переваг перед залізобетоном. Він краще чинить опір виникненню та розвитку мікро- і макротріщин, витриваліший до вібраційних та ударних впливів, має підвищену міцність на стирання, вищу в'язкість і пружність. Використання фібробетону спрощує технологію виготовлення конструкцій: суміщаються в єдиний процес приготування, армування, укладання та ущільнення фібробетонної суміші. Збільшити міцність нормальних і похилих перерізів, а також зменшити деформативність фібробетонних конструкцій можна за рахунок комбінованого армування: фібрами та стержньовою арматурою.

Узагальнений досвід застосування фібробетону показав, що найефективніше використовувати цей матеріал в залізобетонних конструкціях для підвищення їх тріщиностійкості, в тонкостінних конструкціях, в спорудах, що працюють на ударні навантаження (хвильорізах, в покриттях аеродромів, автомобільних доріг, фортифікаційних спорудах, в сейсмостійких конструкціях, палях, трубах, резервуарах, які піддаються впливу агресивного середовища) [13,14,15,16].

Фібробетон можна використовувати для покриття автомобільних доріг товщиною 100 мм. Таке покриття влаштовують з щебеневого бетону класу В25 і армують фібрами діаметром 0,5 мм, довжиною 60 мм при коефіцієнті фібрового армування $m_{fv} = 0,01$. Фібробетонну суміш транспортують і укладають за допомогою бетоноукладальної машини.

Не менш важливим є проектування плит покриттів для трамвайних колій. Їх армують комбіновано — зварною сіткою із стержньової арматури і сталевими фібрами діаметром 0,5 мм, довжиною 50 мм при коефіцієнті об'ємного армування $m_{fv} = 0,0125$. Фібри замінюють при цьому за об'ємною масою верхню та нижню фіксуючі сітки. Як матрицю для таких плит використовують дрібнозернистий бетон складу Ц/П=1:1,25 (за масою) при В/Ц=0,35. Плити виготовляють у формах. Фібробетонну суміш ущільнюють за допомогою вібрації.

Заміна типового покриття на фібробетонне дозволяє зменшити його товщину вдвічі і відмовитися від склотканини, руберойду та бітуму. Економічний ефект при цьому отримують за рахунок економії матеріалів та підвищеного терміну безремонтної експлуатації дороги.

Вказані вище переваги фібробетону дозволяють використовувати його при будівництві тротуарів ділянками довжиною 12...15 м у порівнянні зі звичайною укладкою при довжині ділянок 5...6 м. Підвищена межа міцності на згин дозволяє зменшити товщину бетонного покриття тротуарів близько на 25%. При цьому уповільнюється процес руйнування полотна під впливом

перепаду температур.

Техніко-економічний аналіз засвідчує, що сталеві фібробетонні плити, особливо при роликовому методі формування, економічніші у 2,5 рази за аналогічні залізобетонні. Термін їх експлуатації за рахунок підвищеного опору, високої зносо-, морозостійкості та ударної в'язкості вищий[4].

Не менш актуальними є і фібробетонні підлоги. У цивільному будівництві їх по праву оцінили за міцність і менший показник крихкості. Високі експлуатаційні показники досягаються за рахунок застосування високоякісного цементу (М500), високотехнологічних полімерних добавок і спеціального фракціонованого піску. В результаті, навіть промислові підлоги з фібробетону, до яких висувають особливі вимоги, не утворюють тріщин, не дають усадку, а тільки набирають міцність з роками.

Фібробетонні підлоги в залежності від експлуатаційних вимог можуть бути різними через марки використаного цементу (М150-500). При заливанні підлоги максимальний перепад на 2 м складає всього 2 мм. Це дозволяє різко зменшити витрати на подальші оздоблювальні роботи. При використанні фібробетону, підлоги заливаються дуже швидко, особливо при застосуванні пневмообладнання (можлива заливка до 60 поверхів).

Рекомендовано заливати підлоги з фібробетону в наступних приміщеннях:

- промислових та виробничих цехах;
- всіх типах складських приміщень;
- автомайстернях, гаражах, автостоянках, паркінгах, в тому числі, багатопверхових;
- виставкових і торгових залах;
- всіх видах ангарів - аеродромних, вантажних;
- офісних будівлях і приміщеннях.

Ефективність застосування фібробетону в будівельних конструкціях може бути досягнута за рахунок зниження трудовитрат на арматурні роботи, суміщення технологічних операцій на приготування суміші та армування,

продовження терміну експлуатації конструкцій і зниження витрат на різні види поточного ремонту.

За останні десятиріччя із фібробетону виготовлялися плити покриття, елементи незнімної опалубки, оболонки, палі, аеродромні та дорожні плити [4]. Вони показали себе як високо-ефективні конструкції. Достатньо вивчені і властивості фібробетону, що зарекомендував себе як надійний і ефективний будівельний матеріал, який дозволяє на якісно новому рівні вирішувати проблему підвищення інтенсифікації виробничих процесів в будівельній галузі.

До недоліків фібробетону можна віднести труднощі в досягненні однорідності матеріалу, а саме введення волокон. Цей процес є однією з найважливіших операцій приготування суміші, так як бетонна суміш з фіброю має здатність до грудкування, а самі фібри можуть створювати «їжаки», що різко погіршують її якість. Це не дозволяє досягти необхідного ущільнення матеріалу у виробі. Для подолання цієї проблеми використовують різні методи введення фібри у бетонну суміш, а саме:

- вводять фібру в останню чергу в попередньо перемішану суміш цементу, води та заповнювачів;
- спочатку змішують заповнювачі та волокна, а потім додають цемент та воду.

Деколи для виготовлення сумішей використовують особливі види змішувачів, наприклад змішувач з додатковою пульсуючою дією на суміш, що сприяє руйнуванню грудок. Для виготовлення деяких конструкцій використовують одночасний набризк волокна та дрібнозернистої бетонної суміші.

Введення волокон сприяє пониженню рухливості бетонної суміші та спричиняє деякі складності у приготуванні фібробетону. Зазвичай в таких випадках не значно збільшують кількість води та вміст найдрібніших частинок (цементу та дрібного заповнювача) [6].

1.2 Міцнісні характеристики фібробетону

Дослідженням фібробетону та проблемами широкого його впровадження в будівельну галузь займалося багато як вітчизняних так і закордонних вчених [17,18,19]. Ними отримано ряд експериментальних результатів, які характеризують міцнісні та деформативні властивості дрібнозернистого бетону, сталеві фібри та фібробетону. Такі дослідження, як правило, виконувалися паралельно з пошуками ефективних технологічних прийомів виготовлення експериментальних зразків. Незважаючи на деякі відмінності у результатах досліджень, отриманих різними авторами, можна простежити загальні закономірності, що дозволяють оцінити вплив дисперсного армування на властивості бетонів.

Багато дослідників вивчали міцність сталеві фібробетону та його модуль пружності, використовуючи у своїх дослідженнях різні за міцністю та складом матриці, різноманітні сталеві волокна, а також змінюючи об'ємний відсоток фібрового армування, кількість зразків та їх розміри.

В огляді [7,20] наведені дані різних дослідників, що характеризують можливість покращення деяких властивостей бетону при введенні в нього хаотично орієнтованих сталевих волокон. Результатами показано, що введення волокон в бетон значно підвищує його ударостійкість, опір термічним впливам та стиранню, міцність на розтяг і т. д. Проте необхідно відмітити, що покращення властивостей залежить від параметрів фібрового армування.

Наступним автором [21] досліджено призмову міцність та модуль пружності фібробетону. Клас бетону матриці при цьому приймався в межах від В15 до В30, фібра використовувалась діаметром 0,5 мм і 0,3 мм довжиною відповідно 50 та 80 мм. Відсоток армування становив 1...2,2%. Автори робіт [22,23] для визначення таких характеристик фібробетону використовували як матрицю дрібнозернистий бетон класу В15 і сталеві фібри діаметром 0,8 мм, довжиною 90 мм з відсотком армування 1...2,5%, а інші [24,25] для визначення кубикової міцності фібробетону у якості матриці приймали дрібнозернистий

бетон класу В10...В25 та різну за розмірами та формою поверхні фібру при різних відсотках об'ємного вмісту фібр.

Також велися дослідження на основі проведення повного факторного експерименту знаходячи кубикову та призмову міцність фібробетону та його модуль пружності[26]. Клас дрібнозернистого бетону матриці приймався В10, В20 та В30, відсоток армування становив 1,5; 2,0 і 2,5 %. При виготовленні зразків використано сталеву фібру з маловуглецевого дроту діаметром 0,3; 0,5; 0,8 мм та довжиною 30, 50, 80 мм відповідно.

Автором [27] було проведено факторний експеримент, де в склад дрібнозернистого бетону вводилась фібра трьох видів (рис.1.1):

- металева хвилеподібна довжиною 30 мм, діаметром 0,8 мм;
- металева анкерна довжиною 50 мм, діаметром 0,8 мм;
- металева плоска довжиною 32 мм, шириною 3,2 мм.

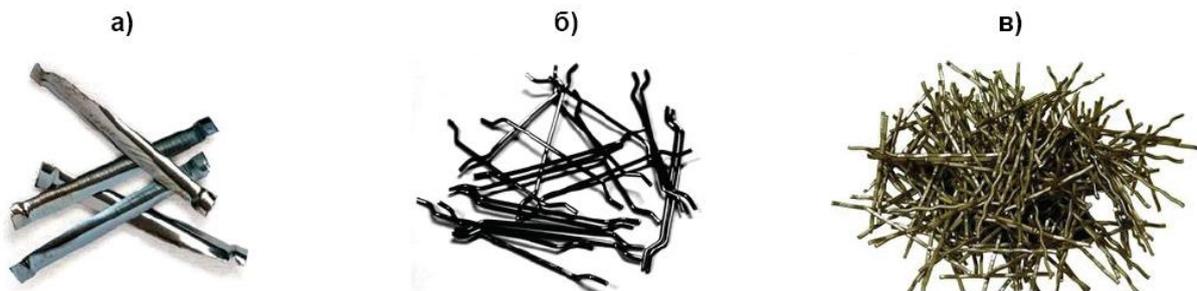


Рис.1.1. Види металевої фібри: а) плоска фрезерована; б) анкерна; в) хвиляста

Експериментальні дослідження були пов'язані з вивченням поведінки бетонних елементів, дисперсно-армованих металевою фіброю, при визначенні характеристик міцності та деформативності.

Фібробетонну суміш готували в 2 етапи. Спочатку готувалася бетонна суміш, а на другому етапі відбувалось армування необхідним процентом фібри. Після чого суміш перемішувалася механізованим способом і в ручну укладалась в змащені маслом форми.

Випробування 36 зразків здійснювалося на універсальній випробувальній машині за стандартною методикою. Результати експериментальних досліджень приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Результати випробувань дрібнозернистих бетонних зразків дисперсно-армованих металевою фіброю

| Характеристика | Розмірність | Без фібри | Види фібр | | |
|------------------------------|-------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| | | | плоска фрезерована | анкерна | хвиляста |
| Кубикова міцність | МПа | 50,2 | 56,3 | 55,8 | 57,4 |
| Призмova міцність | МПа | 35,0 | 39,2 | 38,7 | 39,9 |
| Міцність на розтяг при згині | МПа | 13,7 | 15,9 | 16,6 | 16,8 |
| Модуль пружності | МПа | $35,8 \cdot 10^3$ | $41,1 \cdot 10^3$ | $39,8 \cdot 10^3$ | $41,7 \cdot 10^3$ |

Аналізуючи отримані данні необхідно зазначити, що фібробетон з використанням хвилястої фібри в якості армуючого матеріалу володіє найкращими міцнісними характеристиками[27].

У вітчизняній практиці виробництва високоміцних дисперсно-армованих бетонів не мається на меті використання в них високоміцних матриць класів В 100 і більше, зниження вмісту дисперсної арматури з 5. .7 до 1. .3% та застосування супер- і гіперпластифікатор нового покоління, сприяння значному зниженню витрати води в бетонних сумішах.

У дослідженнях в якості компонентів комплексних модифікаторів високоміцного дисперсно-армованого бетону пропонуються для використання тонкодисперсні добавки - наповнювачі з високими пуцолановими властивостями на основі мелених техногенних відходів каменеподрібнення природних матеріалів у поєднанні з супер- і суперпластифікаторами і армуючими волокнами.

Дисперсне армування дозволяє модифікувати бетон на двох рівнях: мікрорівні - рівні цементної матриці і макрорівні - рівні цементного бетону. Дворівневе дисперсне армування бетону розглядається як ефективний засіб підвищення міцності при стиску і розтягу, а також тріщиностійкості і ударної в'язкості.

В роботі [28] обґрунтований ступінь дисперсного армування, що не перевищує 1,0-1,5% від маси сухих компонентів бетонної суміші, при міцності бетону до 100МПа.

Встановлено, що поєднання високощільної і високоміцної цементної матриці з армуючими елементами забезпечує отримання високоміцного дисперсно-армованого бетону міцністю на розтяг при згині не менше 16 - 18 МПа при міцності на стиск 100 - 110 МПа. Запропоновано математичний опис ударної міцності високоміцного дисперсно-армованого бетону в залежності від ступеня армування і довжини армуючих елементів.

З числа досліджуваної сукупності добавок водоредукуючої та гідрофобізуючої дії автором[28] виявлені високоефективні гіперсуперпластифікатори на полікарбосилатній основі, що забезпечують водоредукуючий ефект не менше 35%, і металоорганічні гідрофобізатори, що дозволяють знизити водопоглинення цементного каменю на 30% і бетону - на 45%. Мінімальне водопоглинення 4,63% - для цементного каменю і 2,89% - для дисперсно-армованого бетону забезпечується при введенні комплексу добавок, взятих у співвідношенні 0,25:0,75 (олеат натріяхтеарати).

Дисперсне армування бетону різними видами волокон в обсязі від 0,3 до 2% дозволяє підвищити міцність при стиску на 4 - 14% при використанні синтетичних і на 6 - 16% - при використанні сталевих волокон, а міцність на розтяг при згині, відповідно, на 10 - 45 і 14 - 53%. Оптимальне дозування сталевих волокон, що забезпечує максимальне підвищення міцності на осьовий стиск залежно від змісту і довжини волокна, не перевищує 1%. Для синтетичних волокон цей показник становить 0,4%. Міцність сталевібробетону на розтяг при згині закономірно збільшується з підвищенням дозування волокон від 0,3 до 2%. Встановлено можливість підвищення міцності бетону, посиленого синтетичними волокнами, шляхом обробки їх біхроматом калію на 10%.

Виявлено значне підвищення міцності фібробетону в умовах динамічних навантажень. Встановлено, що найбільшою ударною міцністю володіє бетон,

армований сталевим волокном довжиною 10 мм при дозуванні 1,5%. Показник роботи, витраченої на руйнування сталевібробетону, перевищує цей показник для бетону, армованого синтетичним волокном, в 2 - 2,5 рази. Виконана оцінка техніко-економічних і екологічних аспектів використання модифікуючих добавок в технології дисперсно-армованого бетону. Встановлено зниження собівартості 1 м³ бетону на 15%, зниження кількості викидів вуглекислого газу в атмосферу на 30%, при цьому економія арматурної сталі склала 50%[28].

З використанням трьохфакторного експерименту наступним науковцем[29] розроблено математичну модель залежності межі міцності при стиску і згині сталевібробетону, залежно від складу цементно-піщаної матриці і коефіцієнта армування, що дозволяє враховувати особливості структуроутворення сталевібробетону при тепловологій обробці. При цьому визначено, що міцність сталевібробетон через 28 діб після теплової обробки, становить від 91 до 126% міцності сталевібробетону аналогічних складів, що тверднули при нормальних умовах. Оптимальне цементно-піщане відношення, при якому формується максимально міцна цементно-піщана матриця сталевібробетона, що піддається тепловологій обробці, становить 1:1,25. Для сталевібробетону з цементно-піщаним відношенням 1:1 і 1:3, мінімально ефективні коефіцієнти армування становлять 2 і 1,5% відповідно[29].

Більшість дослідників акцентують увагу на тому, що введення в бетон хаотично орієнтованих коротких волокон мало впливає на міцність сталевібробетону на стиск і на модуль пружності, але приводить до суттєвого збільшення міцності на розтяг та згин.

Для обчислення розрахункового опору сталевібробетону на стиск рекомендується залежність [30]:

$$R_{sfb} = R_b + k_n^2 \varphi_f \mu_{fv} R_f, \quad (1.1)$$

де R_b – опір бетону матриці на осьовий стиск (призмova міцність);

k_n – коефіцієнт, що враховує роботу фібр в перерізі, перпендикулярному до напрямку зовнішньої стискаючої сили;

μ_{fv} – коефіцієнт об’ємного армування;

R_f – опір фібр розтягання;

φ_f – коефіцієнт ефективності фібрового армування, який визначається за формулою

$$\varphi_f = (5 + L)/(1 + 4,5L); \quad (1.2)$$

де $L = (k_n^2 \mu_{fv} R_f)/R_b$

В дослідженнях вчених [12,30] показано, що міцність сталевібробетону на розтяг в 1,5...2 рази більша за міцність бетону матриці, а за даними [31] ця цифра сягає 3,5. Стійкість сталевібробетону до розвитку тріщин при осьовому розтягу в 1,5...2,5 рази вища у порівнянні зі звичайним бетоном та підвищується зі збільшенням об’ємного відсотку армування (μ) і зменшенням діаметра фібр.

Міцність сталевібробетону на розтяг залежить від об’ємного коефіцієнта армування, виду, розмірів і характеру поверхні фібр, класу бетону матриці, а також від геометричних розмірів перерізу елемента. При цьому, розрізняли два випадки руйнування сталевібробетонного елемента: перший – висмикування усіх фібр, другий – розрив і висмикування частини фібр. У першому випадку, при $l_{f,an} > l_f/2$, міцність сталевібробетону на розтяг визначають за формулою [4]

$$R_{sfb,t} = m_2 R_b [(k_{02} \mu_{fv} l_f)/(4 \eta d_f) + 0,08 - 5,5 \mu_{fv}], \quad (1.3)$$

а у другому випадку, при $l_{f,an} < l_f/2$ –

$$R_{sfb,t} = m_1 [(k_{02} \mu_{fv} R_f)(1 - l_{f,an}/l_f) + R_b(0,08 - 5,5 \mu_{fv})], \quad (1.4)$$

де $l_{f,an} = (\eta d_f R_f)/R_b$, (1.5)

$l_{f,an}$ – мінімальна довжина анкерування фібр в бетоні, що відповідає їх обриву при висмикуванні, мм;

$m_1=1,1$ для фібр з анкерами і $m_1=1,0$ для фібр без анкерів;

$m_2=1,2$ – коефіцієнт умов роботи фібр;

d_f і l_f – відповідно діаметр та довжина фібр, мм;

k_{02} – коефіцієнт орієнтації фібр відносно напрямку головних розтягувальних напружень;

η – характеристика зчеплення фібр з бетоном.

Отже, в цілому ряді конструкцій, де чітко виражена розтягнута чи стиснута зони, з метою економії сталі, сталеві фібробетон можна вводити тільки в розтягнуту зону. При цьому висота шару сталеві фібробетону може змінюватися в залежності від потреб: міцності, тріщиностійкості чи деформативності конструкцій.

Слід зазначити, що в умовах короткочасного навантаження граничний стиск, нижню межу тріщиноутворення та коефіцієнт поперечних деформацій сталеві фібробетону досліджували в меншій мірі. У своїх дослідженнях вченими використано різні класи дрібнозернистого бетону-матриці (в межах від В10 до В30), сталеві фібри діаметром від 0,3 до 1 мм, довжиною 30...150 мм. Відсоток фібрового армування змінювався в межах 1,0...2,5 %.

Багато досліджень показало, що при порівнянні із аналогічними показниками бетону-матриці, фіброве армування підвищує кубикову міцність сталеві фібробетону на 30%, призмову міцність – на 32%, початковий модуль пружності на 20%, граничну стисливість – на 23%, нижню межу тріщиноутворення – на 15% та знижує коефіцієнт поперечних деформацій сталеві фібробетону – на 12%. Міцність сталеві фібробетону на осьовий розтяг може бути вища за міцність бетону матриці на 60...100% , а на розтяг при згині – на 140...200 % [4]. Більш високу міцність сталеві фібробетону на розтяг при згині можна пояснити тим, що сталеві фібри, які мають більшу густину ніж бетон, осідають під власною вагою, тому нижня розтягнута зона елемента, що працює на згин, буде більше містити фібр.

Автором [32] було проведено ряд експериментів вивчаючи тонкостінні вироби кільцевої конфігурації з дрібнозернистого шлакобетону, армованого металевою фіброю. Його застосування дозволить знизити собівартість аналогічних конструкцій (кілець оглядових колодязів, безнапірних і напірних водопропускних труб, засипних автодорожніх арочних мостів).

Дослідження дійсної роботи тонкостінних кільцевих елементів з внутрішнім діаметром 1 м проводились на зразках-кільцях, що складались з двох

серій. До першої серії відносилися кільця марки КТ(Ш) – з типовим армуванням, а до другої – кільця марок КФ(Ш)-0; КФ(Ш)-0,5; КФ(Ш)-1,0; КФ(Ш)-1,5 з дисперсним армуванням по об'єму 0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% відповідно. На рис. 1.2 наведена схема армування дослідних елементів.

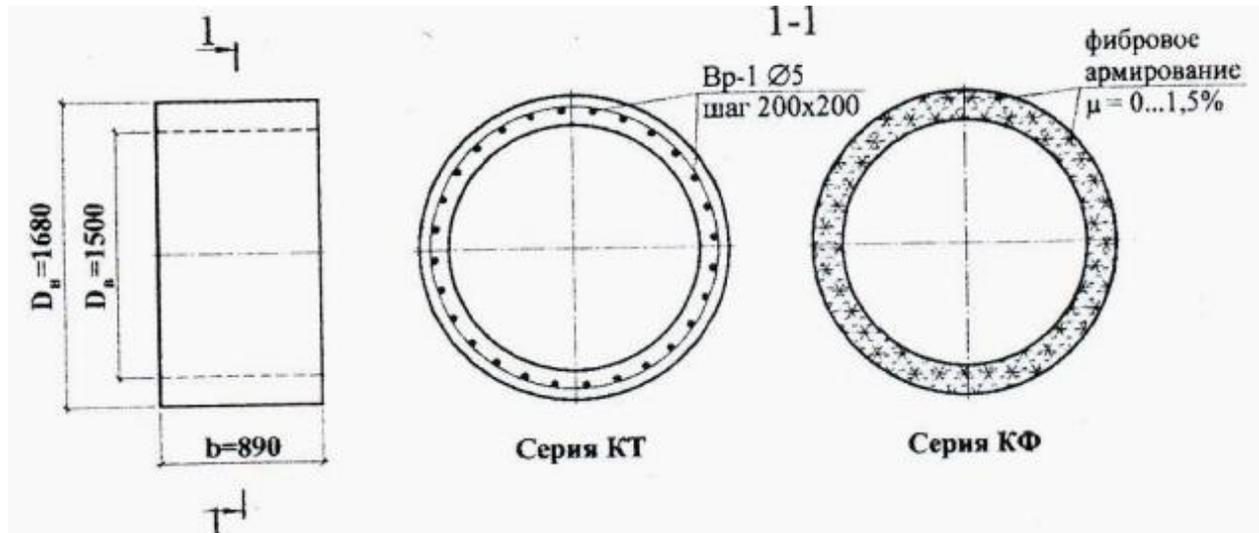


Рис. 1.2. Схема армування дослідних кільцевих елементів

Міцність на стиск визначали на зразках кубиках з сталевіброшлакобетону і на момент випробувань отримані результати зрівнювались з розрахунковими, що визначаються за формулою

$$R_{fb} = R_b + (k_n^2 \cdot \varphi_f \cdot \mu_{fv} \cdot R_f) , \quad (1.6)$$

де R_b - опір осьовому стиску бетону-матриці;

R_f - опір фібрової арматури розтягу;

k_n - коефіцієнт, що враховує роботу фібр в перерізі, перпендикулярному напрямку зовнішнього стискаючого зусилля;

φ_f - коефіцієнт ефективності армування фіброю.

Результати експериментальних досліджень наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

**Порівняння розрахункових та експериментальних значень міцності
на осьовий стиск зразків-кубиків**

| Марка зразка | Коефіцієнти | | Міцність бетону при стиску, МПа | | Коефіцієнт запасу R_{fb2} / R_{fb1} |
|--------------|-------------|-------------|------------------------------------|---|---|
| | μ_{fv} | φ_f | за ф-лою 1.6 R_{fb1} | дослід (куби 10x10x10 см) R_{fb2} | |
| КФ(Ш)-0 | 0 | 5/5 | 43,7/43,7 | 43,7 | 1,00/1,00 |
| КФ(Ш)-0,5 | 0,005 | 4,71/4,38 | 46,6/50,1 | 48,5 | 1,04/0,97 |
| КФ(Ш)-1,0 | 0,01 | 4,46/3,90 | 49,3/55,1 | 52,3 | 1,06/0,95 |
| КФ(Ш)-1,5 | 0,015 | 4,23/3,52 | 51,6/59,1 | 54,8 | 1,06/0,93 |

Аналізуючи дані вище наведеної таблиці робимо висновок, що міцність зразків армованих фіброю значно вища порівняно з неармованими. Далі було проведено експеримент з двома серіями кільцевих елементів. Найбільше значення граничного згинального моменту було отримано при випробуванні зразка з з максимальним вмістом фібри (1,5%)[38].

Встановлено, що діаметр фібрової арматури не має значного впливу на кубикову та призмову міцність сталевібробетону, а також його початковий модуль пружності, в основному ці показники зростають прямо-пропорційно збільшенню об'ємного коефіцієнта армування та класу бетону матриці. Проте, більший вплив на вище вказані характеристики має клас бетону матриці. Варто зауважити, що при збільшенні відсотку армування та зменшенні діаметра фібр для низьких класів матриці є характерним більш інтенсивніше нарощування міцності та пружності.

Основним фактором, що забезпечує спільну роботу фібр та матриці є міцність зчеплення фібр з бетоном. Цей фактор залежить, в основному, від сил зчеплення за утворені періодичним профілем виступи фібр, від сил тертя і сил склеювання між фіброю та бетоном, від довжини зони анкерування фібр, а також від марки цементу, водоцементного відношення, орієнтації фібр, віку і класу бетону. У [4] зазначено, що міцність зчеплення фібр з бетоном зростає

аналогічно зростанню міцності самого бетону, на протязі перших 28 діб тужавлення. При зменшенні довжини анкерування фібр вдвічі та використанні відпрофільованих фібр, авторами стверджується, що дана міцність зростає в 1,5...2 рази.

1.3 Деформативність і тріщиностійкість сталевібробетону

Поряд з вивченням фізико-механічних характеристик сталевібробетону, багато науковців займалися дослідженнями деформативних властивостей сталевібробетонних конструкцій. Варто зауважити, що застосування СФБ веде до підвищення жорсткості, тріщиностійкості та міцності елементів, які працюють на згинання. Це також дозволяє підвищити експлуатаційні показники конструкцій. Наприклад, наступний автор [33] вивчав деформативність та міцність сталевібробетонних елементів при стисканні. Під час досліджень ним виявлено, що напружено-деформований стан сталевібробетонних та комбіновано армованих елементів практично майже не відрізняється від аналогічних бетонних та залізобетонних. Пояснює це тим, що фібри мало впливають на перерозподіл напружень в поперечному перерізі стиснутого елемента та незначно підвищують міцність сталевібробетону на стиск.

У наступній роботі[2] зазначено, що найбільш ефективним рішенням для зменшення крихкості бетону є фіброармування. В залежності від розмірів, механічних характеристик і жорсткості волокон утворення тріщин можливо обмежити як на мікрорівні, так і на макрорівні.

Тріщини в бетоні можуть з'являтися внаслідок вимушених і власних напружень, а також зовнішніх навантажень. Внаслідок виникнення тріщин в бетон можуть проникати речовини, що спричиняють корозію сталі чи пошкоджують сам бетон. Від ширини тріщини в значній мірі залежить те, в якому об'ємі відбувається проникнення речовин, що спричиняють пошкодження. Наявність волокон може призвести до обмеженню ширини тріщини і тим самим до збільшення довговічності бетонних та залізобетонних

конструкцій. Крім того, «вузькі» тріщини можуть знову закриватися завдяки т. н. «самолікуванню бетону». При самолікуванні в тріщинах кристалізуються $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або CaCO_3 . Також не малу участь беруть гідратовані компоненти цементу, котрі після утворення тріщини знову можуть вступати в контакт з водою.

Якщо ж корозія сталеві арматури все ж таки починається, то за рахунок пластичності фібробетону ушкодження конструкції спочатку залишаються незначними, тобто тріщини, спричинені тиском продуктів корозії (об'ємне розширення заліза при оксидації), перекриваються. За рахунок цього не відбувається ні відколу, ні відшарування бетонного захисного шару.

Істотним механізмом дії волокон в бетоні є так зване «зшивання» тріщин, яке в найкращому випадку повинно здійснюватися на всіх рівнях, що розглядаються (мікро, мезо, макро). На рис. 3 схематично представлено зображення тріщини в звичайному залізобетоні з крихкою матрицею та з квазіпластичною матрицею (фібробетоном), а також відповідні потоки силових ліній. За рахунок утворення безлічі дрібних рівномірно розповсюджених в квазіпластичній матриці тріщин сталева арматура локально не перевантажується. Дані тріщини допомагають сталі нести навантаження на розтяг, а деформації бетону та сталі в значній мірі є сумісними[2].

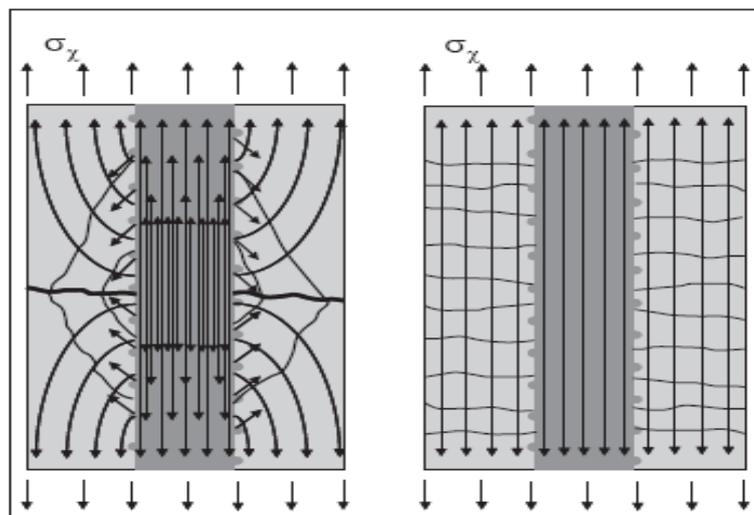


Рис. 1.3. Схема тріщин та потоку силових ліній в звичайному залізобетоні та фібробетоні

В затверділому бетоні завжди виникають мікротріщини, які утворюються внаслідок раних вимушених і власних напружень, наприклад, в результаті усадки бетону або відводу тепла при гідратації цементу. В більшості випадків вони виникають в пористій зоні контакту «цементний камінь/зерно заповнювача». Зі збільшенням навантаження починається ріст цих тріщин. При потраплянні основи тріщини на волокно подальше її поширення на певний час припиняється, тобто волокно сприймає розтягуючі зусилля, що діють на основу тріщини в результаті чого, вона стабілізується. Таким чином виникають безліч коротких, дуже тонких невидимих мікротріщин, то для ефективного запобігання розвитку таких тріщин важливим фактором є велика кількість волокон малого діаметра. Довжина волокон при цьому має другорядне значення, так як на даній стадії розвитку тріщини не відбувається ніяких відносних переміщень між волокнами і матрицею цементного каменю.

Подальше збільшення навантаження спричиняє до збільшення ширини і довжини мікротріщини і об'єднання їх у тріщини. При цьому відбувається відносне переміщення волокон відносно матриці цементного каменю, внаслідок чого волокна, що перекривали тріщину, сприймають розтягуючі зусилля за рахунок напружень зчеплення і волокна можуть передавати їх через краї тріщини. Таким чином розширення тріщини обмежується. Рисунок 1.4 ілюструє відмінності в характеристиках тріщин в неармованому і армованому бетоні[2].

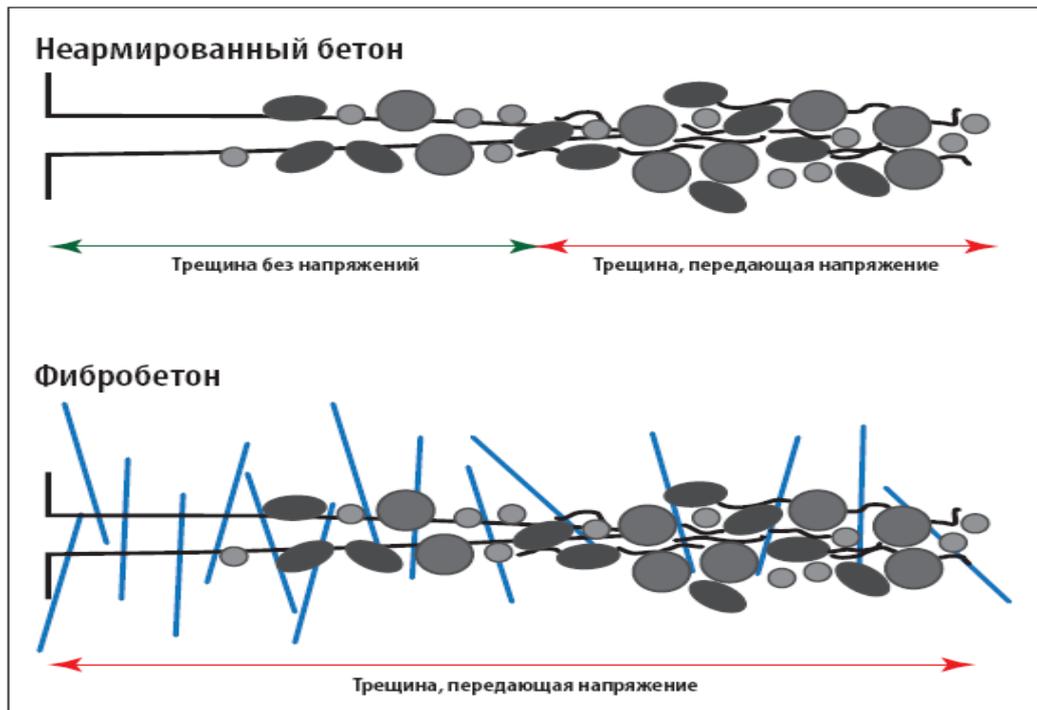


Рис. 1.4. Схематичне представлення тріщини в неармованому і фібробетоні

В дослідженнях сталевібробетонних балок на згинання виявлено, що момент тріщиноутворення в 2...2,3 рази вищий за момент тріщиноутворення в аналогічних бетонних згинальних елементах та у два рази більший, ніж в таких самих армоцементних балках. В сталевібробетонних конструкціях, що працюють на згинання, ширина розкриття тріщин в 2,5...6 раз менша, ніж в залізобетонних конструкціях. Внаслідок цього вченими запропоновано розраховувати сталевібробетонні елементи за міцністю та жорсткістю аналогічно до бетонних, але при цьому необхідно враховувати вплив фібр на ці характеристики.

У наступній роботі [29] велися дослідження, при яких встановлено особливості зовнішнього і внутрішнього тепло- та масопереносу в сталевібробетонах при тепловій обробці. За рахунок збільшення теплопровідності сталевібробетона (залежно від об'ємного вмісту фібри) - від 0,9 до 3,8 Вт/(м°C), зростає інтенсивність теплового потоку, спрямованого всередину матеріалу і знижується градієнт температур по його перетину. При цьому відбувається зниження масопереносу вологи по перетину

сталефібробетона. Дисперсне армування сталевую фіброю знижує деструктивні процеси в дрібнозернистому бетоні, викликані зовнішнім і внутрішнім тепло-і масоперенесенням при тепловологій обробці, дозволяючи отримувати композити з мінімально ушкодженою структурою. Відкрита капілярна пористість сталефібробетону, що піддається тепловологій обробці з цементно-піщаним відношенням 1:1,5 і водоцементним відношенням 0,4, зменшується з 13 до 7%, при збільшенні коефіцієнта армування від 0,5 до 4,5%.

Доведено, що основним чинником, що знижує напругу у волокнах, є температурна деформація сталефібробетона після його обробки, зниження значень якої, дозволить найбільш повно використовувати ефект термічного напруження у волокнах і отримувати композити з більш високою міцністю. Визначено, що значення даної деформації зменшується при збільшенні коефіцієнта армування і зменшенні водоцементного і цементно-піщаного відношень[29].

Багато дослідників [21,34] приділяли увагу вивченню комбіновано армованих фібробетонних конструкцій (виготовлених із фібробетону і армованих стержньовою арматурою), які також називають фіброзалізобетонними. Підвищена міцність фібробетону на розтяг в таких конструкціях може бути використана для підвищення їх тріщиностійкості і міцності, а також з метою зменшення ширини розкриття тріщин і прогинів конструкцій. Також значна частина експериментальних робіт присвячена вивченню комбіновано армованих фібробетонних елементів з шаром фібробетону, який займає як частину висоти, так і повну висоту перерізу.

В дослідженнях [35,36,37] показано, що несуча здатність комбіновано армованих фібробетонних елементів, що працюють на згинання, вища за аналогічний показник залізобетонних балок та підвищується при збільшенні довжини фібр, а жорсткість фіброзалізобетонних елементів збільшується при підвищенні відсотку об'ємного фібрового армування.

Автори [38] провели випробування плит розміром 500 x 250 x 100 мм, заармованих стержньювою арматурою діаметром 10 мм класу А–І, відрізками дроту довжиною 25 мм, діаметром 0,3 мм та довжиною 120 мм, діаметром 1,2 мм з об'ємним відсотком армування 2,0 %. На основі обробки експериментальних даних помічено збільшення несучої здатності комбіновано армованих плит на 85 і 93% порівняно із залізобетонними плитами та зменшення ширини розкриття нормальних тріщин в 3 рази при використанні фібр діаметром 1,2 мм і в 9 раз в плитах з діаметром 0,3 мм в порівнянні їх із залізобетонними аналогами.

У наступному джерелі [39] зазначається, що міцність, тріщиностійкість та в'язкість балок розміром 60 x 120 x 900 мм, заармованих стержньювою арматурою діаметром 8 мм класу А–І та фібровою арматурою діаметром 0,2 мм, довжиною 25 мм та об'ємним їх вмістом $\mu=1...2,3\%$, збільшується відповідно на 60...100, 40...50, та на 30...40%.

В дослідженнях [40-43] вченими досліджено балки розміром 127 x 330 x 2130 мм, що виготовлялися з легкого бетону, заармованого каркасами зі сталі з межею текучості 375 МПа, та аналогічні балки виготовлені з тієї ж матриці, які були додатково заармовані сталевими фібрами діаметром 0,38 мм при довжині 25 мм, відсоток об'ємного армування становив $\mu = 1,6\%$. У комбіновано армованих зразках, авторами спостерігалось підвищення моменту тріщиноутворення в два рази, несучої здатності нормальних перерізів на 15 % та зменшення прогинів на 36 % у порівнянні з аналогічними характеристиками залізобетонних зразків.

Слід відмітити, що ряд вчених займалися дослідженнями комбіновано армованих залізобетонних балок при довготривалому згинанні [44]. Автором [44] встановлено, що відношення прогину до згинального моменту від зовнішніх сил (тобто міра прогину) у сталєфібробетонних та комбіновано армованих балках значно менша при порівнянні із контрольними балками без фібрового армування. Найбільш суттєве підвищення показників міцності в комбіновано

армованих зразках отримано при $\mu = 2 \%$, при цьому, міра прогинів зменшилась на 41,1 %.

До важливих деформативних характеристик фібробетону відноситься модуль деформацій фібробетону. Початковий модуль пружності фібробетону перевищує відповідну характеристику матриці на 10 % і залежить лінійно як від неї, так і від коефіцієнта фібрового армування [4]. Зі збільшенням класу бетону матриці і коефіцієнта фібрового армування, модуль пружності фібробетону зростає у першому випадку на 35...40, а в другому – на 10 %, тобто більший вплив має ріст модуля пружності матриці.

Оцінивши напружено-деформаційний стан фібробетонних та фібробетонних комбіновано армованих (фіброзалізобетонних) елементів, що працюють на стиск, розтяг та згин на основі вищеописаних узагальнених експериментальних даних можна ще раз підтвердити значну перевагу дисперсно армованого бетону над звичайним.

1.4 Застосування фібробетону в конструкціях

Внаслідок покращених міцнісних, деформативних та фізичних властивостей фібробетон доцільно використовувати для тонкостінних конструкцій покриттів, стінових огорожувальних елементів, елементів, які працюють в умовах об'ємного напружено-деформаційного стану, в попередньо напружених конструкціях з метою підвищення анкерування арматури, в інженерних спорудах, для підлог виробничих будівель, дорожніх та аеродромних покриттів, в палях і фундаментах під технологічне обладнання, в атомних і теплових електростанціях, для захисних екранів, хвилерізів та набережних, при підсиленні конструкцій тощо [4].

Експериментальні дослідження багатьох вчених [24,4], а також випробування проведені в ЦНДІ промислових будівель показали, що фібробетон доцільно використовувати в плитах, балках і ребрах, колонах та стояках, стінових конструкціях, інженерних спорудах.

Міцність нормальних перерізів фібробетонних балок в зоні максимального зусилля є нижчою порівняно із міцністю залізобетонних. Відомо, що в звичайних залізобетонних балках велика кількість арматури витрачається в якості поперечної, монтажної та розподільчої, тоді як в фібробетонних конструкціях ця арматура може бути відсутня. Тому, для таких елементів необхідно поєднувати фібробетон із стержньовою поздовжньою арматурою. У цьому випадку головні розтягуючі та сколювальні зусилля сприйматиме фібробетон, замінюючи тим самим поперечні та відігнуті стержні, що дозволить зменшити ширину елемента. У разі виникнення тріщин, зусилля, викликані як згинальним моментом, так і поперечною силою, і надалі будуть сприйматися цілим перерізом внаслідок того, що фібри є хаотично орієнтовані у всіх напрямках по цілому об'єму зразка.

Завдяки змішаному армуванню балок можна ефективно використати роботу фібробетону в розтягнутій зоні нормального перерізу та зменшити площу поздовжньої робочої арматури. При стержнях із м'якої сталі доцільно використати їх міцнісні властивості за межею текучості, внаслідок сповільненого розкриття тріщин і зменшення висоти стиснутої зони. За рахунок підвищеного зчеплення арматури зі фібробетоном можна зменшити довжину і підвищити надійність анкерування стержнів.

В стояках та колонах за умовою міцності в експлуатаційній стадії поздовжню арматуру, як правило, встановлюють конструктивно, виключенням є випадки, коли діють значні згинальні моменти. Стержньова арматура сприймає також зусилля, що виникають при транспортуванні, монтажі та від усадки бетону і випадкових ексцентриситетів. Наведені вище функції стержньової арматури можна і доцільно замінити фібробетоном або комбінацією його зі стержнями. У роботі [45] іде мова про можливість економії бетону і частково стержньової арматури в тонкостінних конструкціях, які працюють на стискання. Як приклад, автором наводяться колони двотаврового та кільцевого перерізів, маса яких менша за масу суцільних, а міцність є рівноцінною.

Не менш важливим є застосування фібробетону при виробництві водопропускних труб. Вони є одні з найбільш масових збірних залізобетонних дорожніх виробів, що використовуються в водопропускних спорудах при будівництві та реконструкції доріг усіх категорій у різних кліматичних зонах. У середньому на 1 км дорожнього полотна припадає від 1 до 1,4 споруд на основі водопропускних труб. Експлуатаційна надійність і довговічність даних виробів багато в чому визначає і частоту міжремонтних періодів у циклі експлуатації автодоріг.

Водопропускні труби піддаються значним динамічним і ударним впливам при транспортуванні і укладанні в насип дорожнього полотна, засипці і ущільненні важкою технікою, в циклі експлуатації, а ударна стійкість навіть масивних (наприклад забивні залізобетонні палі), а тим більше тонкостінних конструкцій, як показує практика, явно недостатня. Дана обставина збільшує відсоток дефектності та браку даних виробів.

Перспективним є використання у виробництві водопропускних труб для автомобільних доріг дисперсноармованого бетону, що володіє підвищеною статичною, динамічною міцністю і тріщиностійкістю. Дисперсне армування має позитивний вплив на всю сукупність фізико-механічних характеристик бетону, при цьому особливо значно підвищується його ударна витривалість (до 10 разів). Автором[46] досліджено можливість повної заміни стрижневого армування сталевую фіброю у виробництві при забезпеченні або підвищенні несучої здатності, тріщиностійкості та ударостійкості труб.

Встановлено, що позитивний вплив дисперсного армування на структуру бетону і його фізико-механічні характеристики визначаються наступними факторами:

- перерозподілом напружень при пластичній усадці від найбільш небезпечних зон на весь обсяг бетону; при навантаженні;

- затримка росту тріщин; зниженням концентрації напружень в зоні макродефектів, вирівнюванням напружень в структурі бетону та їх перерозподілом між складовими бетону[46].

Фібробетон можна використовувати в конструкціях, які сприймають сейсмічні та ударні навантаження внаслідок його підвищеної в'язкості та міцності на розтяг при згині, що веде до збільшення деформацій конструкцій без розшарування матриці.

В роботах [4,9] йдеться про застосування фібробетону для зведення монолітних днищ та стінок каналізаційних відстійників, бункерів, силосів та резервуарів. Економічний ефект в даних конструкціях отримують за рахунок зниження матеріаломісткості, а внаслідок цього і вартості будівництва, також має місце спрощення арматурних робіт, зменшення частини стержньової арматури, суміщення процесів армування і бетонування та підвищення легкоукладальності бетону. Автори акцентують увагу на тому, що стінки резервуарів футеровані фібробетоном, мають підвищений опір стиранню при руху по них продуктів зберігання.

Автором[47] статті проведено ряд експериментально-теоретичних досліджень по застосуванню фібробетону у контейнерах для розміщення та захоронення токсичних промислових відходів. Вигода від застосування таких елементів конструкцій може бути досягнута за рахунок зменшення трудовитрат на арматурні роботи. Застосування фібрової арматури дозволяє скоротити кількість арматурних виробів в елементах конструкцій, або відмовитись від них повністю. При цьому суміщаються технологічні операції, збільшується термін служби елементів конструкцій та зменшуються витрати на різноманітні види поточного ремонту.

Залежно від класу небезпеки токсичних речовин розрізняють різні способи їх захоронення. Пастоподібні відходи, що містять водорозчинні речовини 1 класу небезпеки, повинні надходити на захоронення в металевих контейнерах, товщина стінки якого повинна бути не менше 10 мм. Як показав вітчизняний та

зарубіжний досвід, альтернативою металевим контейнерам можуть стати фібробетонні контейнери. У Франції, наприклад, розроблені та використовуються фібробетонні контейнери фірми СОЖЕФИБР, для яких нормативними вимогами Франції встановлено гарантійний термін служби 300 років[47].

У роботі [43] запроектовано та досліджено попередньо напружені ребристі плити покриття розміром 3 x 6 м. Результати випробувань довели, що до появи тріщин в поздовжніх ребрах прогин плити збільшується лінійно, а після появи тріщин при підвищенні навантаження спостерігається нелінійний приріст прогинів. У поздовжніх ребрах процес утворення та розвитку тріщин має свою специфіку: тріщини розкриваються незначно і повільно, проте розташовуються густо, це триває до навантаження 85...90 % від руйнівного. Перед руйнуванням плит ширина розкриття тріщин становила 2 мм, прогин – 1/50 прольоту. Руйнівне навантаження перевищувало розрахункове в 1,4...1,49 рази.

Закордонними вченими також рекомендовано використовувати фібробетон для покриття доріг, злітних смуг аеродромів, проїжджих частин мостів та шляхопроводів, промислових підлог. Ефект при цьому досягається за рахунок високої в'язкості фібробетону, підвищеного опору зсуву та стиранню та можливості суміщення армування та укладання бетонної суміші в один процес. Крім цього, є дані, що дисперсноармований бетон доцільно використовувати у фортифікаційних спорудах, при будівництві набережних, хвилерізів, реконструкції будівель та підсиленні існуючих конструкцій.

В даний час фібробетон застосовується в США, Японії, Німеччини, Росії та інших країнах в монолітних конструкціях: дорожніх і аеродромних покриттях, прогонових будівлях мостів, підлогах промислових і громадських будівель, резервуарах і нафтоховищах, вибухостійких конструкціях, підпірних стінах, футерувальних покриттях, покриттях у вигляді дисперсно армованих торкретних шарів для шахтного та гірничого будівництва і т.д. В якості збірних конструкцій з фібробетону виготовляють: стінові панелі, перегородки, плити покриттів і

перекриттів, дорожні та аеродромні плити, балки, колони, лотки і канали, палі, конструкції тонкостінної незнімної опалубки, труби, кільця оглядових колодязів, різноманітні просторові конструкції і т. д.[29].

Отже, фібробетон варто рекомендувати для широкого використання в конструкціях. Адже, з вищенаведеного можна зробити висновок, що впровадження такого матеріалу є економічно доцільним та ефективним. Особливо в конструкціях, що піддаються впливу агресивних середовищ, для підвищення тріщиностійкості у попередньо-напружених елементах, в конструкціях, які працюють на ударні та знакозмінні навантаження, а також в будівлях і спорудах, що знаходяться в сейсмічно небезпечних районах.

З вище наведеного можна зробити такі висновки:

— фібробетон є ефективним композиційним матеріалом, який може широко використовуватись для виготовлення різноманітних конструкцій ;

— на основі фібробетону можуть виготовлятися фіброзалізо- бетонні конструкції, в яких розтягнута зона підсилюється стержневою арматурою (в таких конструкціях порівняно з конструкціями виготовленими зі звичайного бетону, підвищується жорсткість та тріщиностійкість);

- починаючи з 80-х років минулого століття цікавість до використання фібробетону зростає, що можна пояснити прагненням суттєво підвищити міцність бетонних матеріалів і конструкцій на його основі на стиск, особливо розтяг, їх тріщиностійкість, отримати ефективні конструкції, які б відповідали більш високим експлуатаційним вимогам;

- не зважаючи на низку наведених переваг, фібробетон є ще порівняно новим та не повністю вивченим матеріалом. Дослідження його властивостей є незамінним аспектом у розвитку будівельної галузі.

РОЗДІЛ 2

МЕТА ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОБОТИ

Фіброве армування якісно змінює властивості бетону. При насиченні бетонів сталевими волокнами формується новий матеріал - композит - сталеві фібробетон, властивості якого залежать від параметрів фібрового армування: типу фібри, її об'ємного вмісту, співвідношення між параметрами фібрової арматури і параметрами структури бетонної матриці, рівня дисперсного армування, співвідношення форми і розмірів перерізу і довжини фібри.

Різні дослідники при визначенні фізико-механічних властивостей сталеві фібробетону, залежно від умов експериментів, отримували різні результати. Нижче наведені узагальнені короткі дані.

Міцність. Під міцністю матеріалу розуміється той максимальний рівень напружень, який може витримати матеріал без істотних змін у своїй структурі при очікуваних умовах роботи. Характеристики міцності сталеві фібробетону (СФБ) залежать від класу вихідного бетону - матриці, параметрів фібрового армування, характеру поверхні фібри, її геометрії і розмірів перерізу елемента і їх співвідношення.

Міцність при стиску. Зростання міцності СФБ при стисненні прямо пропорційний класу бетону - матриці, збільшенню вмісту фібри, зменшенню відносної довжини і практично не залежить від їх діаметру. За даними досліджень розрахунковий опір СФБ стисненню – R_{fb} може перевищити призмову міцність вихідного бетону – R_b від 40% до 2-х разів. Міцність при стиску СФБ є контрольною характеристикою при проектуванні СФБК і може бути обрана відповідно до класу СФБ по міцності на стиск або визначена розрахунком.

Міцність при розтягу СФБ зростає прямо пропорційно збільшенню вмісту фібри і їх довжини, а також збільшенню міцності зчеплення фібри з матрицею. Міцність СФБ при розтягуванні є однією зі значних характеристик матеріалу.

Незалежно від довжини і об'ємного вмісту фібри міцність СФБ при осьовому розтягу (R_{fbt}) вичерпується з появою першої тріщини. За даними фахівців[48] R_{fbt} перевищує міцність вихідного бетону при розтягу R_{bt} до 5 - 6 разів. Міцність на розтяг може бути обрана відповідно до класу СФБ по міцності на розтяг або визначена розрахунком.

Міцність на розтяг при згині є один з важливих показників СФБ, який залежить від вмісту фібри і її довжини, міцності її зчеплення з бетонною матрицею, класу бетонної матриці і перевищує міцність вихідного бетону в 3,5-5 разів. Як і інші характеристики СФБ, міцність СФБ при згині може бути обрана відповідно до класу СФБ по міцності на розтяг при згині.

Динамічна міцність СФБ при стиску (призма) на 35% більша міцності вихідного бетону. Вона зростає зі збільшенням об'ємного вмісту фібри і зменшенням їх відносної довжини. Розвиток тріщин і руйнування в сталевібробетоні настає повільніше, ніж в залізобетоні, більш ніж у 10 разів. Причому в'язкість руйнування, характерна для СФБ при впливі ударного навантаження, до 40 разів вище аналогічної характеристики бетону. За літературними даними межа витривалості сталевібробетонних конструкцій вище залізобетонних на 30% і становить $0,95 R_{bn}$.

Деформативність.

Силіві деформації. Показником деформативності СФБ є модуль деформації - непостійна величина і істотно залежить від стадійності роботи. Початковий модуль пружності СФБ залежить як від відповідного показника вихідного бетону, так і від коефіцієнта фібрового армування. Значення початкового модуля пружності СФБ вище відповідної характеристики бетону матриці на 30% ... 100%.

Деформативність СФБ характеризується, крім зазначеного вище, граничними деформаціями стиску $\varepsilon_{fc,u}$ і розтягу $\varepsilon_{ft,u}$. Граничні деформації стиску СФБ перевищують стисливість бетону до 3-х разів і становлять в середньому 12

$\cdot 10^{-3}$, граничні деформації розтягу СФБ істотно вищі аналогічній характеристиці бетону, за наявними даними вони складають $6 \dots 8 \cdot 10^{-4}$.

Деформації повзучості СФБ нижче повзучості вихідного бетону при стиску на 10 ... 21%, при розтягу - на 40 ... 50%.

Об'ємні деформації усадки. Можна відзначити, що фібра стримує деформації усадки бетону в СФБ і сприяє їх більш рівномірному протіканню. Зменшення деформацій усадки СФБ відносно неармованого бетону, за оцінками фахівців, становить 30 ... 60%. При підвищених температурах усадка СФБ спостерігається нижче усадки вихідного бетону на 10 ... 23%.

Тріщиностійкість.

Для СФБ характерна висока тріщиностійкість, яка залежить не тільки від об'ємного вмісту фібри, а й від дисперсності армування. Чим більш однорідна бетонна матриця і, чим вище рівень дисперсності армування, тим вище, при інших рівних умовах, межа тріщиностійкості СФБ, яка до 20-ти разів може перевищувати тріщиностійкість вихідного бетону.

Довговічність.

Довговічність матеріалу визначається такими його властивостями як, морозостійкість, корозійна стійкість, водонепроникність і, посередковано, тріщиностійкість. За оцінками фахівців СФБ характеризується високими показниками довговічності.

За експериментальними даними, морозостійкість СФБ при об'ємному коефіцієнті армування (m_{fv}) 0,01 в 7 разів вище в порівнянні з вихідним бетоном[48].

Водонепроникність СФБ, як інші його гідрофізичні властивості, залежить від структури матеріалу, прямо пропорційна дисперсності фібрового армування та вмісту фібри в об'ємі матеріалу конструкції. За оцінками фахівців, водонепроникність СФБ перевищує дану характеристику бетону майже в 2 рази.

Корозійна і фільтраційна стійкість СФБ визначаються кількістю фібрової арматури і структурою пористого простору СФБ. Матриця СФБ володіє

підвищеними захисними властивостями по відношенню до волокон. Експериментально доведено, що в СФБ утворюються капіляри з розміром не більше 0,01 мм - це робить його вологонепроникним, а значить і має високу корозійну стійкість, що перевищує майже в 2 рази корозійну стійкість вихідного бетону.

Теплофізичні властивості СФБ - теплопровідність λ_f , температуропровідність α_f , теплоємність c_f в загальному випадку залежать від об'ємного вмісту фібри і вологості матеріалу. Температуропровідність СФБ вище показника вихідного бетону до 16%; теплопровідність СФБ перевищує дану характеристику бетону від 10 до 30%, значення теплоємності СФБ практично дорівнює теплоємності бетону.

Вогнестійкість, вогнетривкість.

Сталефібробетон є більш вогнестійким матеріалом, ніж сталь і залізобетон, так як при температурах пожежі він практично зберігає на нормативний строк свої міцнісні і деформативні властивості. Дослідження СФБ, що піддавався високотемпературному нагріванню при пожежі (до $t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$), проведені з метою оцінки його працездатності, показали, що енергія руйнування СФБ до 200 разів перевищує цей показник звичайного бетону, а коефіцієнт інтенсивності напруження - в 12 разів. При цьому СФБ з фіброю з низьковуглецевої сталі витримує нагрівання, без зменшення міцності, до температури 450 - 537 $^\circ\text{C}$; з фіброю з нержавіючої сталі до температури 1590 - 1595 $^\circ\text{C}$.

Стиранність.

Дослідження СФБ на стиранність свідчать про структурне поліпшення цього матеріалу в порівнянні з неармованим бетоном. СФБ має показник стиранності в 2 рази кращий порівняно з неармованим бетоном, так як фібра стирається спільно з бетонною матрицею[48].

Отже, сталефібробетон має значно кращі характеристики ніж неармований бетон, тому його подальше вивчення є доцільним та актуальним.

Метою даної магістерської роботи є вивчення методів дослідження тріщиностійкості композиційного матеріалу, на основі дрібнозернистого бетону наповненого сталевими волокнами, який забезпечить підвищення експлуатаційних характеристик.

Мета роботи передбачає вирішення наступних задач:

1. Дослідити вплив сталевих волокон на міцність та тріщиностійкості бетону.
2. Оптимізувати склад сталевібробетону за об'ємним вмістом та довжиною волокна.
3. Дослідити тріщиностійкість сталевібробетонів різними методами.

В основу наукових досліджень покладена гіпотеза: сталеві волокна, що мають більший модуль пружності ніж матриця, сприяють підвищенню механічних властивостей фібробетону. Волокна, створюючи стрингери між берегами тріщини сприятимуть підвищенню тріщиностійкості сталевібробетону.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Планування експерименту – це комплексна процедура вибору числа дослідів й умов їх проведення, необхідних та достатніх для розв’язання поставленої задачі з необхідною точністю.

З метою досконалого вивчення особливостей зміни міцнісних і деформативних характеристик фібробетону (СФБ), прийнято за доцільне провести три серії експериментальних досліджень, відповідно до мети та задач поставлених у роботі.

Зокрема, першу серію зразків із СФБ передбачено випробовувати в режимі, який відповідатиме матриці три-факторного плану Бокса-Бенкіна, для того, щоб змоделювати роботу дисперсно-армованого матеріалу при різному вмісті металевих волокон та пластифікуючої добавки, та вивести адекватне рівняння регресії, яке б описувало міцнісні характеристики фібробетону та його густину в межах варіювання досліджуваних факторів.

На експериментальних зразках другої серії поставлена задача дослідити міцність при згині фібробетону.

У третій серії дисперсно-армовані зразки досліджувались на тріщиностійкість.

У першій серії випробували зразками - кубики розміром $70 \times 70 \times 70$ мм. У другій серії досліджувались призми на згин розміром $70 \times 70 \times 280$ мм. У третій серії дослідними зразками були плити розміром $800 \times 600 \times 40$ мм.

У зв’язку з поставленими задачами було випробувано:

– 45 кубиків в режимі планованого експерименту (перша серія), при цьому зразки досліджувались при одноразовому центральному стиску;

– 15 призм, що досліджувались на згин (друга серія).

– 2 плити (третья серія).

Усього випробувано 45 кубиків, 15 призм та 2 плити (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Характеристика та кількість дослідних зразків

| № серії | Характеристика та розміри зразків, мм | Кількість, шт. | Досліджувані фактори |
|---------|---------------------------------------|----------------|---|
| 1 | Фібробетонні кубики 70x70x70 | 45 | Кубикова міцність фібробетону при випробуванні зразків одноразовим короточасним навантаженням у віці 28 діб. |
| 2 | Призми з фібробетону 70x70x280 | 15 | Призмova міцність фібробетону при випробуванні зразків на згин у віці 28 діб. |
| 3 | Фібробетонні плити 800x600x40 | 2 | Час, навантаження, податливість плити, ширина розкриття тріщини, довжина утвореної тріщини при випробуванні плити на розтяг |

Дослідні елементи першої, другої та третьої серій, виготовлялися із дрібнозернистого бетону та армувалися сталевною фіброю. Для дослідження першої серії були обрані наступні фактори: довжина волокна, його об'ємний вміст та витрати пластифікуючої добавки. Умови планування експерименту наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Умови планування експерименту

| Фактори | | Рівні варіювання | | | Інтервал варіювання |
|-------------------------|------------------|------------------|----|-----|---------------------|
| Натуральний вигляд | Кодований вигляд | -1 | 0 | +1 | |
| Довжина волокна, мм | X ₁ | 20 | 35 | 50 | 15 |
| Об'ємний вміст, % | X ₂ | 1 | 2 | 3 | 1 |
| Концентрація добавки, % | X ₃ | 0,6 | 1 | 1,4 | 0,4 |

Матриця, за якою ведеться планування експериментальних досліджень наведена в таблиці 3.3. Кількість дослідів при плануванні експерименту визначаємо за формулою:

$$N = 2^n + 2n + 1$$

де n - кількість факторів плану, $n=3$.

Звідси:

$$N=2^3+2\times 3+1=15$$

Мінімальна кількість повторень рівна 3. Тому загальна кількість дослідів становить 45.

Таблиця 3.3

Матриця планування експериментальних досліджень

| № дослідів | План експерименту (X_i) | | | Квадрат змінних (X_i^2) | | | Взаємодія (X_iX_j) | | | |
|------------|-----------------------------|-------|-------|-----------------------------|---------|---------|------------------------|----------|----------|----|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_1^2 | x_2^2 | x_3^2 | x_1x_2 | x_1x_3 | x_2x_3 | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 4 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 5 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 6 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 7 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 8 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Для отримання ефективного композитного матеріалу – фібробетону, при виготовленні намагались виконати рівномірне розподілення фібри по об'єму елемента. Склад дрібнозернистого бетону, що розрахований на 1 заміс (3 кубика $m = 2,4$ кг) є наступним: Ц = 800 г, Щ = 530 г, П = 1070 г, В/Ц = 0,3, В = 240 мл. Вміст матеріалів для виготовлення першої серії зразків, що змінюються відповідно матриці, занесений до таблиці 3.4.

Призми виготовлялися відповідно до обраних точок з три-факторної матриці експериментів першої серії. Склад дрібнозернистого бетону, що розрахований на 1 заміс (3 призми $m = 9,7$ кг) є наступним: Ц = 3230 г, Щ = 2160 г, П = 4310 г, В/Ц = 0,3, В = 970 мл. Вміст матеріалів для виготовлення другої серії зразків занесений до таблиці 3.5.

Таблиця 3.4

Матеріали для виготовлення першої серії зразків

| № дослід-ду | Довжина волокна, мм | Об'ємний вміст, % | Витрати добавки, % | Маса фібри, г | Об'єм добавки, мл |
|-------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------|-------------------|
| 1 | 50 | 3 | 1,4 | 245 | 11,2 |
| 2 | 20 | 3 | 1,4 | 245 | 11,2 |
| 3 | 50 | 1 | 1,4 | 81 | 11,2 |
| 4 | 20 | 1 | 1,4 | 81 | 11,2 |
| 5 | 50 | 3 | 0,6 | 245 | 4,8 |
| 6 | 20 | 3 | 0,6 | 245 | 4,8 |
| 7 | 50 | 1 | 0,6 | 81 | 4,8 |
| 8 | 20 | 1 | 0,6 | 81 | 4,8 |
| 9 | 50 | 2 | 1 | 162 | 8 |
| 10 | 20 | 2 | 1 | 162 | 8 |
| 11 | 35 | 3 | 1 | 245 | 8 |
| 12 | 35 | 1 | 1 | 81 | 8 |
| 13 | 35 | 2 | 1,4 | 162 | 11,2 |
| 14 | 35 | 2 | 0,6 | 162 | 4,8 |
| 15 | 35 | 2 | 1 | 162 | 8 |

Таблиця 3.5

Матеріали для виготовлення другої серії зразків

| № досліду | Довжина волокна, мм | Об'ємний вміст, % | Витрати добавки, % | Маса фібри, г | Об'єм добавки, мл |
|-----------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------|-------------------|
| 1 | 50 | 3 | 1,4 | 990 | 45,2 |
| 2 | 20 | 3 | 1,4 | 990 | 45,2 |
| 3 | 50 | 1 | 1,4 | 330 | 45,2 |
| 4 | 20 | 1 | 1,4 | 330 | 45,2 |
| 5 | 35 | 2 | 1 | 660 | 32,3 |

Зразки першої і другої серії формували в спеціально виготовлених дерев'яних касетних формах (рис. 3.1).

**Рис. 3.1. Дерев'яні форми для виготовлення зразків**

Ущільнення суміші здійснювали за допомогою віброплощадки. Зразки розпалублювали через добу і зберігали в нормальних умовах протягом 27 діб (рис. 3.2, рис. 3.3). У зв'язку з економією матеріалу (добавки та фібри) в лабораторних умовах міцність при стиску визначали на зразках кубиках 70x70x70 мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2020[49].

Міцність при стиску визначаємо за формулою

$$R = \alpha \frac{F}{A},$$

де F – руйнівне навантаження, Н (кгс);

A – площа робочого перерізу зразка, мм² (см²);

α - масштабні коефіцієнти для приведення міцності бетону до міцності бетону в зразках базових розміру і форми; для зразків 70x70x70 мм він становить 0,85.



Рис. 3.2. Зразки кубики



Рис. 3.3. Зразки призми

Випробування кубиків проводились на пресі ПГ-100 (рис.3.4).

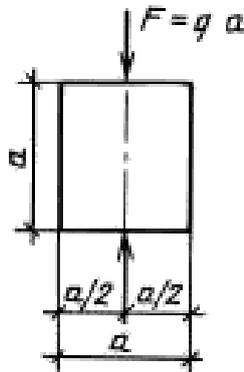


Рис. 3.4. Схема випробувань зразків кубиків на стиск

Випробування призм на чотирьох точковий згин проводились відповідно нижче наведеній схемі (рис. 3.5) на пресі Р-5.

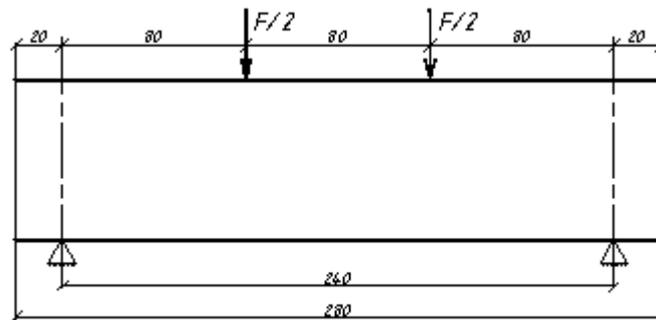


Рис. 3.5. Схема випробувань зразків призм на чотирьох точковий згин

Міцність при згині визначаємо за формулою згідно ДСТУ[49]:

$$R_{32} = \delta \frac{F \cdot l}{a \cdot b^2},$$

де F – руйнівне навантаження, Н (кгс);

a – ширина поперечного перерізу призми, мм (см);

b – висота поперечного перерізу призми, мм (см);

L – відстань між опорами при випробуваннях зразків-призм на розтяг при згині, мм;

δ - масштабні коефіцієнти для приведення міцності бетону до міцності бетону в зразках базових розміру і форми; для зразків 70 x 70 x 280 мм він становить 0,86.

Тріщиностійкість бетону оцінюється по критичному коефіцієнту інтенсивності напруги у вершини тріщини. Цей коефіцієнт отримав назву "в'язкість руйнування" Кіс. Завдяки інтенсивному розвитку лінійної механіки руйнування розроблено й інші критерії, що приймаються за характеристики опору матеріалу розповсюдженню тріщини. Наприклад, критичне розкриття тріщини в її вершині, питома енергія утворення поверхонь, енергія, що звільняється при підростанні тріщини та ін. Існують певні залежності, що дозволяють ці величини перерахувати на Кіс.

Відношення вивільненої енергії до збільшення площі тріщини, що позначається як G може бути також за аналогією з коефіцієнтом інтенсивності напруги Кіс використано як параметр, що визначає умови руйнування. Ці параметри пов'язані з співвідношеннями

$$GE = K_{ic}^2 \quad \text{при плоско-напруженому стані;} \quad (3.1)$$

$$GE = K_{ic}^2 (1-\nu) \quad \text{при плоскій деформації.} \quad (3.2)$$

Зазначається, що G , за визначенням, відповідає узагальненій силі і має термін «сила просування тріщини» [9]. Узагальнена сила може бути визначена за аналогією зі звичайними силами, є формули для її обчислення, пов'язані з методами випробувань матеріалів [10].

$$G = P^2 / 2 (dc / dA,)$$

де P - руйнівне навантаження;

C - податливість зразка з тріщиною;

A - площа тріщини, що знову утворилася.

З рівняння (3.3) видно, що G не залежить від жорсткості конструкцій або випробувальної машини, а залежить тільки від зміни податливості зразка з тріщиною за зміни довжини тріщини.

У цій роботі визначення сили просування тріщини випробовувалися зразки як плит розмірами 100x80x4 см, наповнені різною кількістю і різної довжини волокон. Плити виготовлялися у спеціально виготовлених формах у горизонтальному положенні та ущільнювали на вібраторах лабораторного типу зі стандартними характеристиками. У процесі формування в напрямках довгих сторін пластини закладалися сталеві траверси розмірами 40 x1000 мм, в яких вкручувалися профільовані сталеві анкери діаметром 10 і довжиною 100 мм, так щоб вони були формовані в бетонну суміш. Таким чином, забезпечувалося жорсткість плит при випробуваннях. На стадії формування геометричним центром пластин була утворена початкова тріщина розмірами 52 x 2 мм (рис. 3.6). Також на стадії формування по центру плити була утворена початкова тріщина розміром 52 x 2 мм.

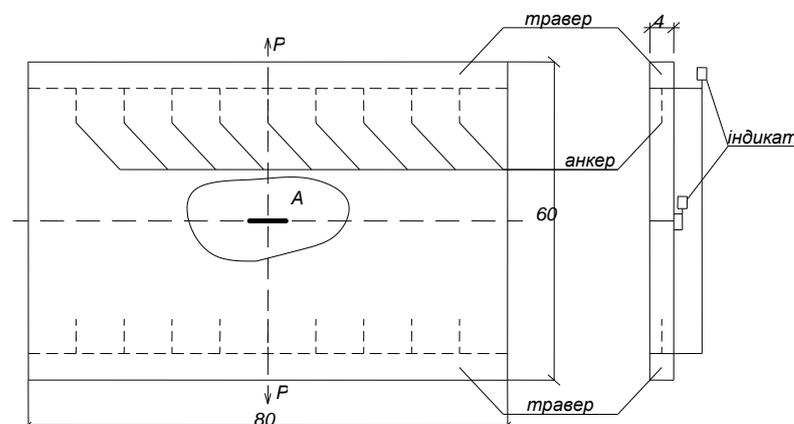


Рис. 3.6 . Загальний вигляд плити з траверсами і анкерами

Через добу після формування плити розпалублювалися і в подальшому зберігалися в нормальних умовах. Перед випробуванням плити були відбілені і наносилось градуювання для фіксування довжини тріщини на різних стадіях навантаження (рис. 3.7). По вертикальній осі зразка наклеювалися опори для закріплення індикатора.

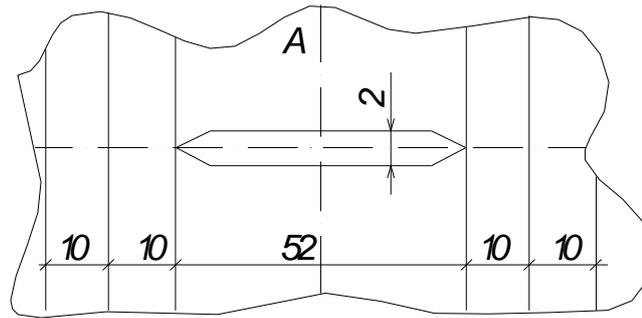


Рис. 3.7. Загальний вигляд і розмір початкової тріщини

Випробування проводились через 28 діб на випробувальній машині . Швидкість навантаження була в межах 1000 Н/хв і постійною на всіх стадіях навантаження. Розтягуючі зусилля від захватів випробувальної машини передавались на траверси через шарнірні пристрої, а дотичні напруження до повного руйнування зразків залишались рівними нулю.

У процесі випробування через кожні 60 с контролювались: час t , навантаження P , довжина тріщини $2a$, c – піддатливість плити та ширина розкриття тріщини b .



Рис. 3.8. Вигляд плити перед випробуванням

За даними цих випробувань тріщиностійкість визначалась за рівнянням:

$$K_{IC}^2 = G \cdot E.$$

Вивільнену енергію G знаходимо за наступною залежністю:

$$G = \frac{P^2}{2} \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial A} \right).$$

де P – руйнуюче навантаження;

C – піддатливість зразка з тріщиною;

A – площа новоутвореної поверхні тріщини.

З останнього рівняння видно, що G не залежить від жорсткості конструкції, а залежить тільки від зміни піддатливості зразка з тріщиною при зміні довжини тріщини.

За даними цих випробувань тріщиностійкість визначалася також за рівнянням

$$K_{ic} = K_m + \tau_i \sqrt{\pi L(l)} (1 - \dot{u}) / (1 + d/D_e)^2 D_e$$

де K_m -тріщиностійкість матриці;

τ_i - напруги зсуву на поверхні розділу волокно-матриця;

L – розмір зони висмикування волокна;

\dot{u} - критичне зміщення перед руйнуванням;

d – відстань між волокнами;

D_e – діаметр волокна.

В'язкість руйнування визначалася також випробуванням зразків розмірами 70x70x280 без надрізів

Руйнівна напруга при згині обчислені в перерізі з надрізом, але без урахування концентрації напруги, виявляються в ряді випадків нижче, ніж напруги в гладких зразках. У деяких випадках міцність матеріалу в надрізі знижується майже вдвічі, і якщо матеріал досить неоднорідний, ця різниця практично зникає.

Вважаючи досліджуваний матеріал неоднорідним матеріалом, визначення K_{ic} випробовувалися зразки без надрізів. В'язкість руйнування обчислювалися за рівнянням;

$$K_{ic} = (3Plc^{\frac{1}{2}})/Bd^2[1.99 - 2.47\left(\frac{c}{d}\right) + 12.97(c/d)^2 - 23.17\left(\frac{c}{d}\right)^3 + 28.8(c/d)^4]$$

де - P - руйнівне навантаження;

B-ширина зразка;

l – відстань між опорами;

d – висота зразка;

c-глибина надрізу.

За глибину надрізу приймалася приведена пористість зразка.

РОЗДІЛ 4

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Матриця представляє собою дрібнозернистий бетон, виготовлений з використанням: портландцементу ПЦ1-500-Н, що відповідає вимогам ДСТУ Б В. 2.7-112-2002[50]. Істинна густина цементу становить 3,0-3,2 г/см³, насипна густина - приблизно 1300 кг/м³. Тонкість помелу портландцементу становить 270 м²/кг.

В лабораторних умовах було виготовлено зразки розмірами 4 x 4 x 16 см для визначення марки цементу ДСТУ Б EN 196-7:2010 [51]. Для цього попередньо проведено перевірку нормальної консистенції цементного розчину. Розплив конусу на струшувальному столику з В/Ц = 0,39 становив 108 мм, що є не менше 106 мм, що задовольняє вимоги ДСТУ[51].

Випробування міцності на згин проведені на зразках-балочках розміром 4 x 4 x 16 см та міцності на стиск половинок балочок у віці 2, 7, 28 діб, що зберігались у ванні з питною водою. Результати випробувань занесені до таблиці 4.1.

Таблиці 4.1

Результати випробувань балочок на стиск та згин

| 2 доби | 7 діб | 28 діб |
|--------------------------------------|-------|--------|
| Межа міцності на згин, МПа | | |
| 3,93 | 4,15 | 7,3 |
| Межа міцності при стиску, МПа | | |
| 22,3 | 33,5 | 51,3 |

Дрібним заповнювачем для матриці був кварцовий пісок з модулем крупності $M_{кр} = 2,36$, насипною густиною $\rho = 1,58$ г/см³ та вологістю $W = 6,4\%$. Основні характеристики піску визначали відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-232:2010 [52].

Результати визначення модуля крупності кварцового піску занесені до таблиці 4.2. На рисунку 4.1 наведено графік зернового складу піску[53].

Таблиця 4.2

Зерновий склад піску

| Розмір сит, мм | Часткові залишки, г | Часткові залишки, % | Повні залишки, % | min | max |
|----------------|---------------------|---------------------|------------------|-----|-----|
| 2.5 | 57.5 | 5.8% | 5.75 | 0 | 20 |
| 1.25 | 91.5 | 9.2% | 14.9 | 15 | 45 |
| 0.63 | 345 | 34.5% | 49.4 | 35 | 70 |
| 0.315 | 226 | 22.6% | 72 | 70 | 90 |
| 0.16 | 225 | 22.5% | 94.5 | 90 | 100 |
| 0 | 55 | 5.5% | | | |
| | 1000 | Mkr= | 2.3655 | | |

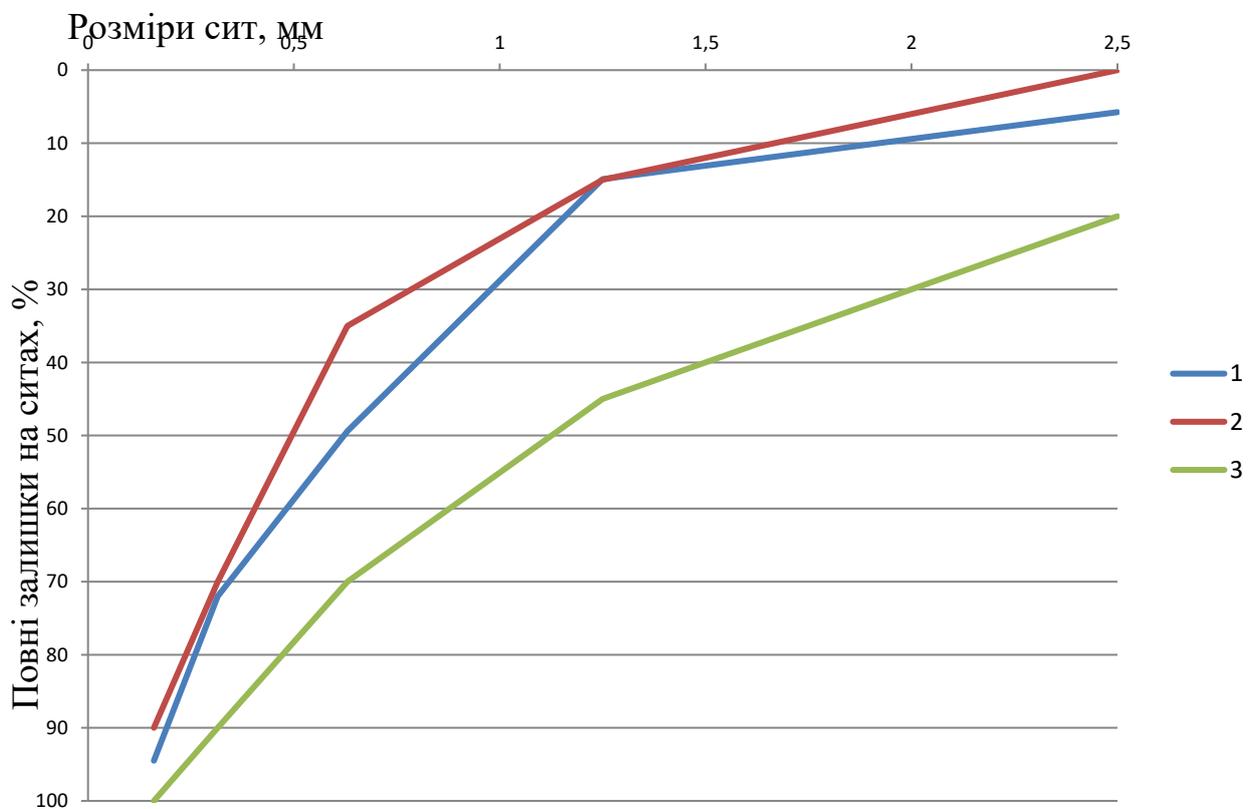


Рис. 4.1. Криві зернового складу піску, де: 1- крупність випробуваного піску; 2 – допустима верхня межа крупності піску; 3 – допустима нижня

В якості крупного заповнювача використано дрібнозернистий щебінь фракції 3-5 мм. Микитинського кар'єру Миколаївської області, насипною густиною $\rho = 1,39 \text{ г/см}^3$, та вологістю $W = 6,5\%$. Основні характеристики щебню визначали відповідно до вимог ДСТУ 9179:2022 [53].

Результати визначення зернового складу щебню занесені до таблиці 4.3. На рисунку 4.2 наведено графік зернового складу щебню[53].

Таблиця 4.3

Зерновий склад щебеню

| Розмір сит, мм | Часткові залишки, г | Часткові залишки, % | Повні залишки, % | min | max |
|----------------|---------------------|---------------------|------------------|-----|-----|
| 0.63 | 445 | 44.50 | 92.50 | 90 | 100 |
| 2.815 | 400 | 40.00 | 48.00 | 40 | 70 |
| 5 | 80 | 8.00 | 8.00 | 0 | 10 |
| 6.25 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0 |
| | 925 | | | | |

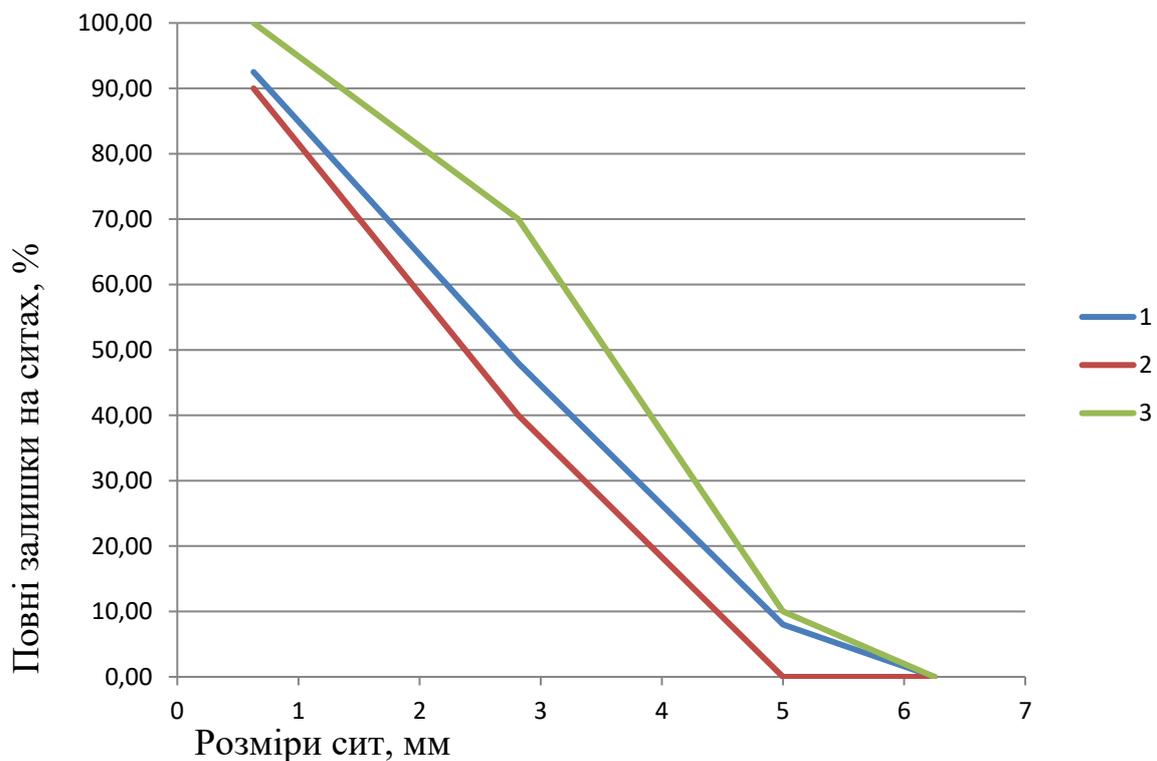


Рис. 4.2. Криві зернового складу піску, де: 1- крупність випробуваного щебеню; 2 – допустима верхня межа крупності щебеню; 3 – допустима нижня межа крупності щебеню

Для отримання менш жорсткої суміші використано суперпластифікатор полікарбоксилат з густиною $1,05 \pm 0,05 \text{ г/см}^3$. Хімічні властивості наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

| Показник | Значення показника |
|---------------------------|--------------------|
| Вміст твердої речовини, % | $40,0 \pm 2,0$ |
| РН (20°C) | 6-8 |
| Вміст хлоридів, % | $\leq 0,1$ |
| Вміст сульфата натрію, % | $\leq 4,0$ |

Дана речовина дає можливість виготовити бетон високої міцності, використовуючи при цьому невелику кількість води. Наступною перевагою полікарбоксилату є його мале дозування у відсотках від маси бетону.

Для виготовлення дослідних зразків використано фібри діаметром 0,8 мм та довжиною 20мм, 35мм та 50мм (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Фібра довжиною 50 мм, 35 мм та 20 мм

Дисперсну арматуру виготовлено із відпрацьованих канатів, які розрізалися спеціальним електропристроєм на відрізки відповідної довжини, а

потім власноруч розпушувалися на окремі відрізки сталевого дроту – фібри. Для очищення від бруду та мастила фібри тричі ретельно промивалися в розчиннику, після чого просушувалися. Фібри профілюванню не піддавалися.

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ПОЯСНЕННЯ

5.1 Програма обробки результатів

Планування експерименту та обробка результатів проводились в програмі STATISTICA 6.1. Програмний пакет програми для статистичного аналізу, розроблений компанією StatSoft, який реалізує функції аналізу даних, управління даних, збір даних, візуалізації даних із залученням статистичних методів.

Для обробки даних експерименту використовуємо розділ в програмі STATISTICA – «Метод промислової статистики». Вхідні дані для аналізу наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Таблиця вхідних даних та експериментальних досліджень

| № досліджу | Довжина волокна, мм | Вміст фібри, % | Вміст добавки, % | Міцність при стиску, МПа | Густина, г/см ³ | Міцність при згині, МПа |
|------------|---------------------|----------------|------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1 | 50 | 3 | 1,4 | 40,06 | 2,49 | 13,12 |
| 2 | 20 | 3 | 1,4 | 44,05 | 2,51 | 7,37 |
| 3 | 50 | 1 | 1,4 | 37,35 | 2,39 | 8,03 |
| 4 | 20 | 1 | 1,4 | 42,70 | 2,40 | 5,14 |
| 5 | 50 | 3 | 0,6 | 37,53 | 2,47 | 13,07 |
| 6 | 20 | 3 | 0,6 | 47,07 | 2,49 | 7,22 |
| 7 | 50 | 1 | 0,6 | 35,62 | 2,38 | 7,91 |
| 8 | 20 | 1 | 0,6 | 29,07 | 2,30 | 4,82 |
| 9 | 50 | 2 | 1,0 | 37,71 | 2,44 | 10,66 |
| 10 | 20 | 2 | 1,0 | 46,56 | 2,47 | 8,00 |
| 11 | 35 | 3 | 1,0 | 46,73 | 2,49 | 9,55 |
| 12 | 35 | 1 | 1,0 | 44,68 | 2,45 | 8,26 |
| 13 | 35 | 2 | 1,4 | 45,88 | 2,47 | 8,43 |
| 14 | 35 | 2 | 0,6 | 42,26 | 2,42 | 8,34 |
| 15 | 35 | 2 | 1,0 | 43,66 | 2,44 | 9,39 |

5.2 Міцність композитів при стиску

Перша серія зразків в кількості 45 кубиків була випробувана на стиск. При випробуваннях спостерігалось крихке руйнування зразків (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Руйнування першої серії зразків

Результати випробувань наведені в таблиці 5.2.

Для отримання функції відгуку програма STATISTICA розраховує коефіцієнти регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + b_5x_3 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_2^2 + b_9x_1^2x_2 + b_{10}x_1^2x_2^2 + b_{11}x_1x_3 + b_{12}x_1^2x_3 + b_{13}x_2x_3. \quad (5.1)$$

Таблиця 5.2

Результати випробувань першої серії зразків

| № дослідю | Навантаження, кгс | Середнє | Площа, см ² | Міцність, кгс/см ² | Середнє, кгс/см ² | Міцність при стиску, МПа |
|-----------|-------------------|---------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 23090 | 23090 | 49,00 | 471,22 | 471,2726 | 40,06 |
| | 23090 | | 48,99 | 471,32 | | |
| | 23090 | | 48,99 | 471,27 | | |
| 2 | 25974 | 25398 | 49,70 | 522,62 | 518,254 | 44,05 |
| | 24821 | | 48,30 | 513,89 | | |
| | 25398 | | 49,01 | 518,25 | | |
| 3 | 19245 | 21264 | 46,20 | 416,56 | 439,389 | 37,35 |
| | 23282 | | 50,37 | 462,22 | | |
| | 21264 | | 48,39 | 439,39 | | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|-------|-------|-------|--------|----------|-------|
| 4 | 24052 | 24437 | 49,00 | 490,86 | 502,3747 | 42,70 |
| | 24821 | | 48,30 | 513,89 | | |
| | 24437 | | 48,64 | 502,37 | | |
| 5 | 21552 | 21168 | 47,60 | 452,77 | 441,5315 | 37,53 |
| | 20783 | | 48,30 | 430,29 | | |
| | 21168 | | 47,94 | 441,53 | | |
| 6 | 26744 | 26744 | 47,61 | 561,73 | 553,7633 | 47,07 |
| | 26744 | | 49,00 | 545,80 | | |
| | 26744 | | 48,30 | 553,76 | | |
| 7 | 19821 | 20687 | 49,00 | 404,51 | 419,076 | 35,62 |
| | 21552 | | 49,70 | 433,64 | | |
| | 20687 | | 49,36 | 419,08 | | |
| 8 | 15014 | 16649 | 48,30 | 310,85 | 341,9857 | 29,07 |
| | 18283 | | 49,00 | 373,12 | | |
| | 16649 | | 48,68 | 341,99 | | |
| 9 | 22898 | 21745 | 49,70 | 460,72 | 443,6078 | 37,71 |
| | 20591 | | 48,28 | 426,49 | | |
| | 21745 | | 49,02 | 443,61 | | |
| 10 | 26359 | 26648 | 48,30 | 545,73 | 547,7246 | 46,56 |
| | 26936 | | 49,00 | 549,71 | | |
| | 26648 | | 48,65 | 547,72 | | |
| 11 | 27320 | 27320 | 50,41 | 541,96 | 549,7535 | 46,73 |
| | 27320 | | 49,00 | 557,55 | | |
| | 27320 | | 49,70 | 549,75 | | |
| 12 | 25398 | 25206 | 48,30 | 525,84 | 525,6057 | 44,68 |
| | 25013 | | 47,61 | 525,37 | | |
| | 25206 | | 47,96 | 525,61 | | |
| 13 | 25974 | 26071 | 48,30 | 537,76 | 539,7619 | 45,88 |
| | 26167 | | 48,30 | 541,76 | | |
| | 26071 | | 48,30 | 539,76 | | |
| 14 | 21937 | 24052 | 46,20 | 474,83 | 497,1613 | 42,26 |
| | 26167 | | 50,37 | 519,50 | | |
| | 24052 | | 48,38 | 497,16 | | |
| 15 | 25782 | 24821 | 48,99 | 526,27 | 513,7024 | 43,66 |
| | 23859 | | 47,61 | 501,13 | | |
| | 24821 | | 48,32 | 513,70 | | |

Коефіцієнти рівняння регресії наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Коефіцієнти рівняння регресії міцності при стиску

| Фактор | Регресія; R-кв.=.995; Скор..93 (Зміна.sta) 3 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=1.82405 3П: Міцність при стиску, МПа | | | | | |
|---------------------------|---|--------|--------|-------|-------------------|-------------------|
| | Регрес. Козф. | Ст.Ош. | t(1) | p | -95.% Дов.Пред | +95.% Дов.Пред |
| Сред/Св.член | -213.529 | 54.018 | -3.953 | 0.158 | -899.899 | 472.841 |
| (1)Довжина волокна, мм(L) | 14.233 | 3.829 | 3.718 | 0.167 | -34.413 | 62.880 |
| Довжина волокна, мм(Q) | -0.210 | 0.056 | -3.786 | 0.164 | -0.916 | 0.495 |
| (2)Вміст фібри, %(L) | 199.887 | 65.633 | 3.046 | 0.202 | -634.062 | 1033.836 |
| Вміст фібри, %(Q) | -41.660 | 16.281 | -2.559 | 0.237 | -248.533 | 165.212 |
| (3)Вміст добавки, %(L) | 44.328 | 25.092 | 1.767 | 0.328 | -274.490 | 363.147 |
| Вміст добавки, %(Q) | 2.562 | 10.338 | 0.248 | 0.845 | -128.797 | 133.922 |
| 1L на 2L | -11.135 | 4.046 | -2.752 | 0.222 | -62.541 | 40.271 |
| 1L на 2Q | 2.467 | 1.004 | 2.456 | 0.246 | -10.293 | 15.226 |
| 1Q на 2L | 0.158 | 0.058 | 2.719 | 0.224 | -0.579 | 0.894 |
| 1Q на 2Q | -0.035 | 0.014 | -2.424 | 0.249 | -0.217 | 0.148 |
| 1L на 3L | -1.649 | 0.872 | -1.892 | 0.310 | -12.725 | 9.427 |
| 1Q на 3L | 0.027 | 0.013 | 2.156 | 0.276 | -0.134 | 0.189 |
| 2L на 3L | -10.406 | 1.688 | -6.164 | 0.102 | -31.857 | 11.045 |

В результаті розрахунків отримуємо наступне рівняння регресії для визначення міцності при стиску:

$$y = -213,529 + 14,233x_1 - 0,21x_1^2 + 199,887x_2 - 41,66x_2^2 + 44,328x_3 + 2,562x_3^2 - 11,135x_1x_2 + 2,467x_1x_2^2 + 0,158x_1^2x_2 - 0,035x_1^2x_2^2 - 1,649x_1x_3 + 0,027x_1^2x_3 - 10,406x_2x_3. \quad (5.2)$$

За даними таблиці 5.1 будуємо діаграми маргінальних середніх, розглядаючи вплив кожного з факторів окремо на міцність (рис. 5.2 – 5.4).

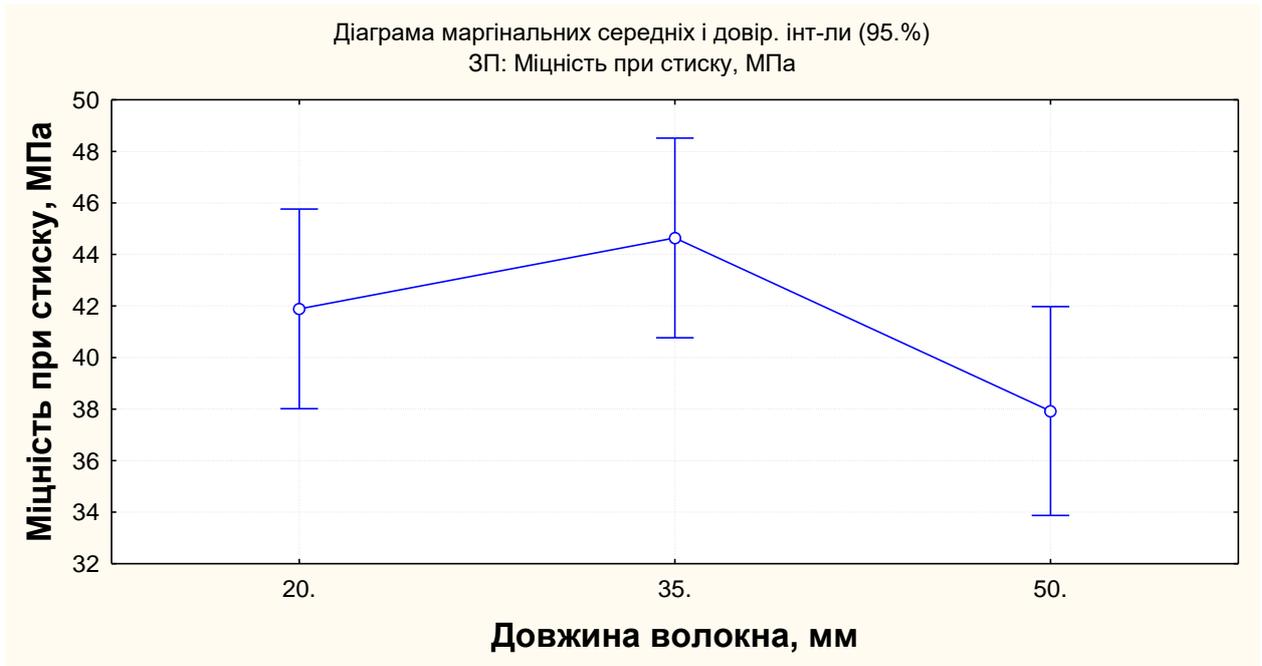


Рис. 5.2. Діаграма маргінальних середніх залежності міцності при стиску від довжини волокна

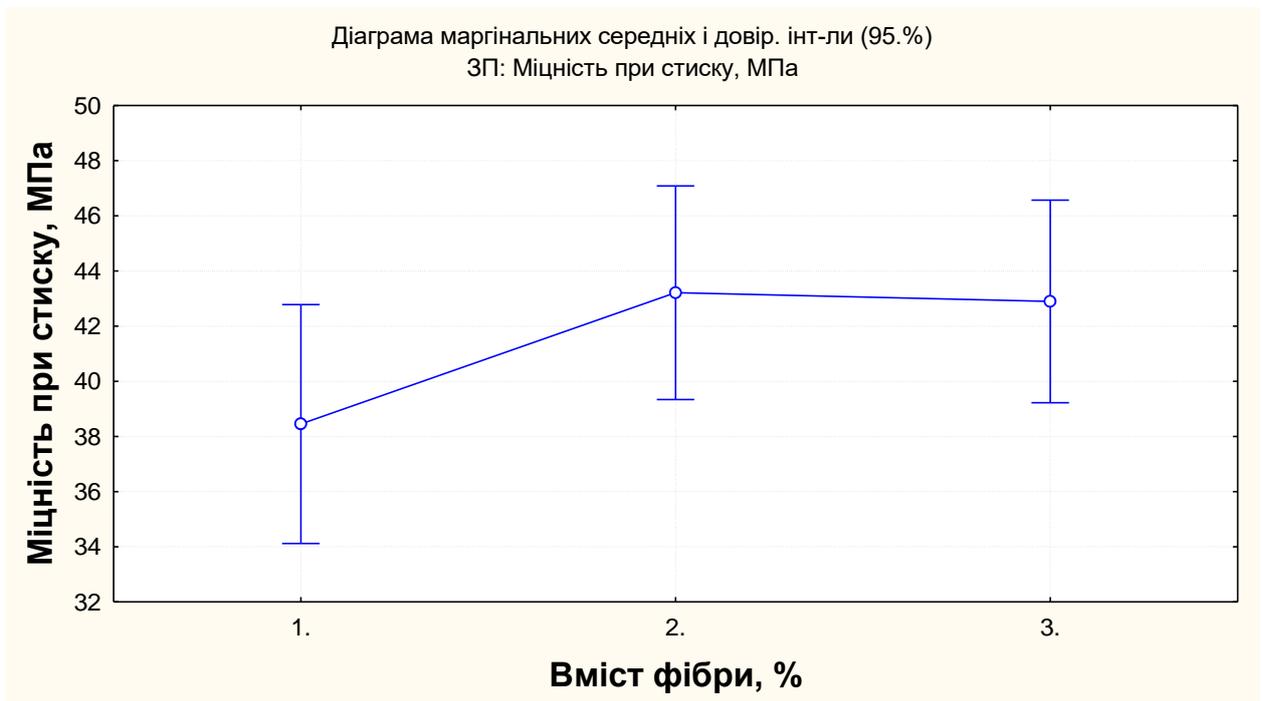


Рис. 5.3. Діаграма маргінальних середніх залежності міцності при стиску від вмісту фібри

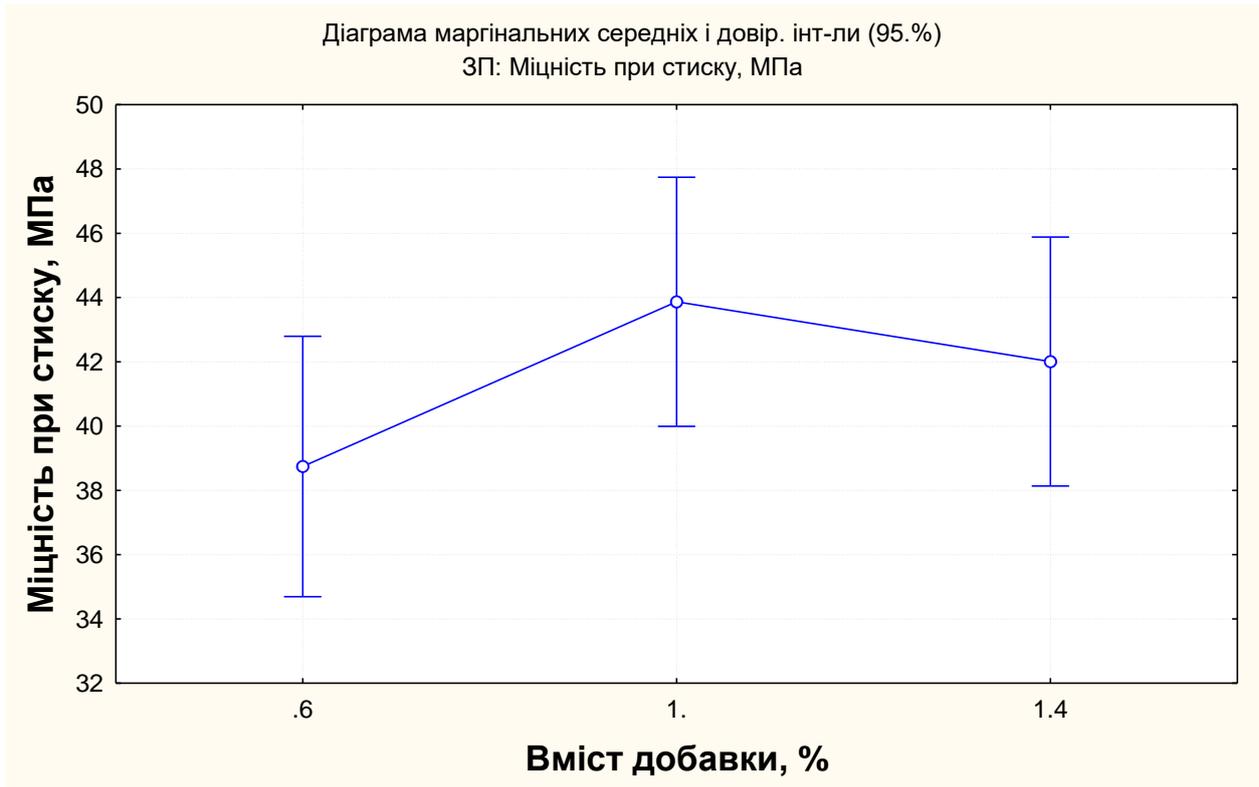


Рис. 5.4. Діаграма маргінальних середніх залежності міцності при стиску від концентрації добавки

Аналізуючи вище наведені діаграми впливу окремих факторів на міцність при стиску, можна зазначити наступне:

- оптимальна довжина волокна становить 35 мм;
- вміст волокна 1% має значно менший вплив на міцність порівняно з 2% і 3%, що обумовлено тим, що мала кількість волокна не здатна створити жорсткий каркас, рівномірно розподілятися по всьому об'ємі виробу;
- оптимальний вміст пластифікатора становить 1%.

Відповідно таблиці даних визначаємо кореляцію факторів та їх взаємодій. Кореляція (від лат. *Correlatio* - співвідношення, взаємозв'язок), кореляційна залежність - статистичний взаємозв'язок двох або декількох випадкових величин (або величин, які можна з деяким допустимим ступенем точності вважати такими). Коефіцієнт кореляції набуває значень від -1 до +1.

Він показує на скільки той чи інший фактор впливає або не впливає на кінцевий результат. В таблиці 5.4 наведено тлумачення значенням коефіцієнта кореляції.

Таблиця 5.4

Значимість коефіцієнта кореляції

| Кореляція | Негативна | Позитивна |
|------------------|------------------|------------------|
| Відсутня | -0,09 до 0,0 | 0,0 до 0,09 |
| Низька | -0,3 до -0,1 | 0,1 до 0,3 |
| Середня | -0,5 до -0,3 | 0,3 до 0,5 |
| Висока | -1,0 до -0,5 | 0,5 до 1,0 |

Аналізуючи таблицю 5.5 можемо зробити висновок, що добавка та вміст фібри має середній вплив на міцність, а фактор їх поєднання можна не враховувати, так як він становить $0,08 < 0,09$.

Таблиця 5.5

Кореляція факторів

| Фактор | Міцність при стиску, МПа |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Довжина волокна, мм (X_1) | -0.35 |
| Довжина волокна, мм (X_1^2) | 0.47 |
| Вміст фібри, % (X_2) | 0.24 |
| Вміст фібри, % (X_2^2) | 0.26 |
| Вміст добавки, % (X_3) | 0.31 |
| Вміст добавки, % (X_3^2) | 0.35 |
| X_1 на X_2 | -0.49 |
| X_1 на X_3 | -0.12 |
| X_2 на X_3 | -0.08 |

З карти Парето наочно видно, що всі три фактори впливають на міцність при стиску, так як оцінка ефекту їхнього впливу (коефіцієнт кореляції Пірсона) $p > 0.05$ (рис. 5.5).

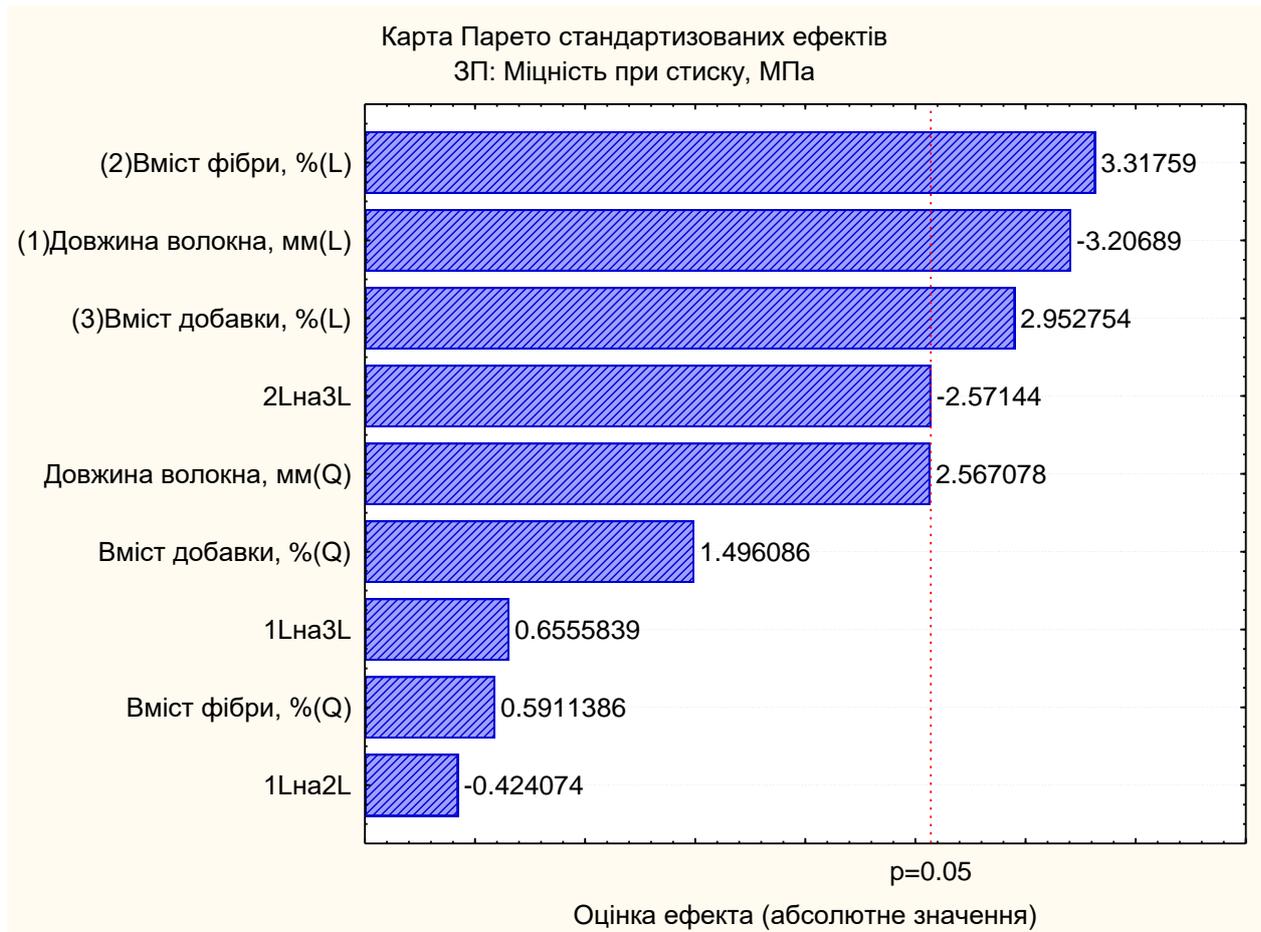


Рис. 5.5. Карта Парето стандартизованих ефектів

На рисунку 5.6 наведено поверхню впливу двох факторів X_1 та X_2 (довжини волокна та вмісту фібри) на міцність при стиску. Наочно ми можемо спостерігати, що вплив довжини волокна на міцність має криволінійний характер, і пік значення приходить при $l = 35$ мм. При збільшенні вмісту фібри спостерігається тенденція до підвищення міцності. Наприклад: при $X_1 = 20$ мм, $X_2 = 1\%$ міцність при стиску набуває значення 29,07 МПа, а при $X_1 = 20$ мм, $X_2 = 3\%$ – 44,05 МПа. Отже, збільшення вмісту волокна від 1 % до 3% має позитивний вплив на характеристику міцності. Очевидно, що з збільшенням вмісту волокна, що сприймає частину напружень, збільшується кількість стрингерів, що стягують берега мікротріщин. Таким чином, здержується процес зростання мікротріщин у макротріщини і міцність при стиску зростає.

Збільшення довжини волокна до $l = 50$ мм при вмісті 3% призводить до зменшення значення міцності при стиску, це пояснюється не рівномірним

розподілом фібри по об'єму зразків та утворення грудків при перемішуванні та формуванні.

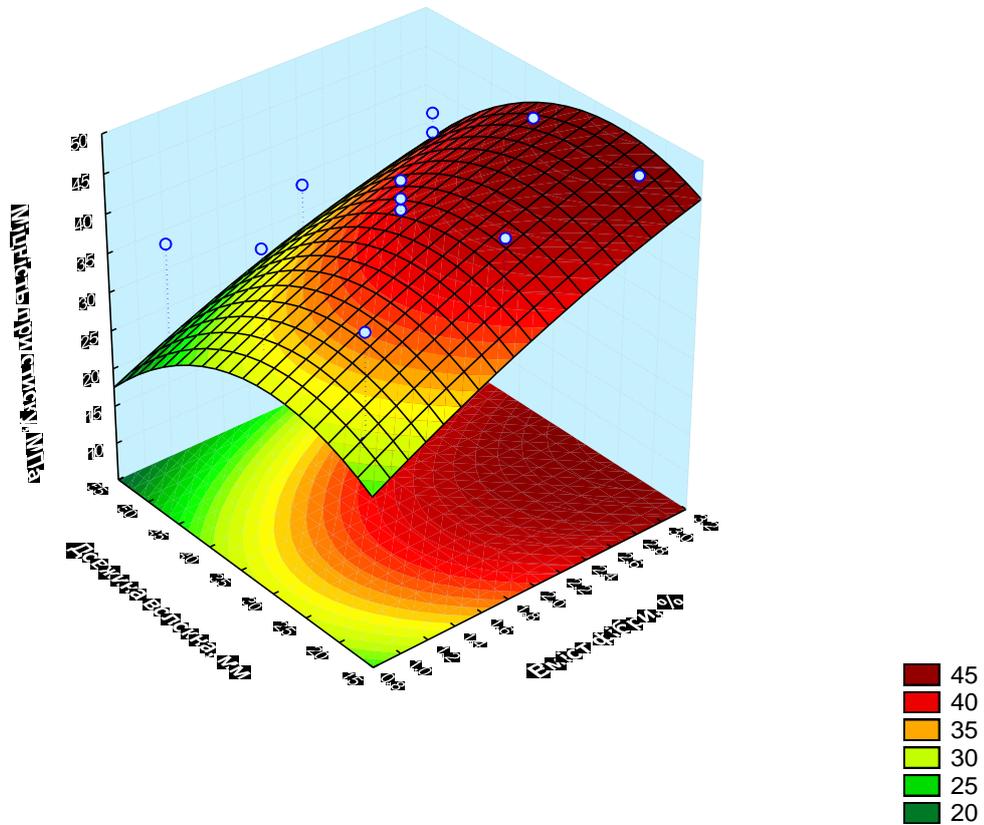


Рис. 5.6. Поверхня впливу довжини волокна та вмісту фібри на міцність

На рисунку 5.7 наведено поверхню впливу двох факторів X_2 та X_3 (вмісту фібри та добавки) на міцність при стиску при сталій довжині 50 мм.

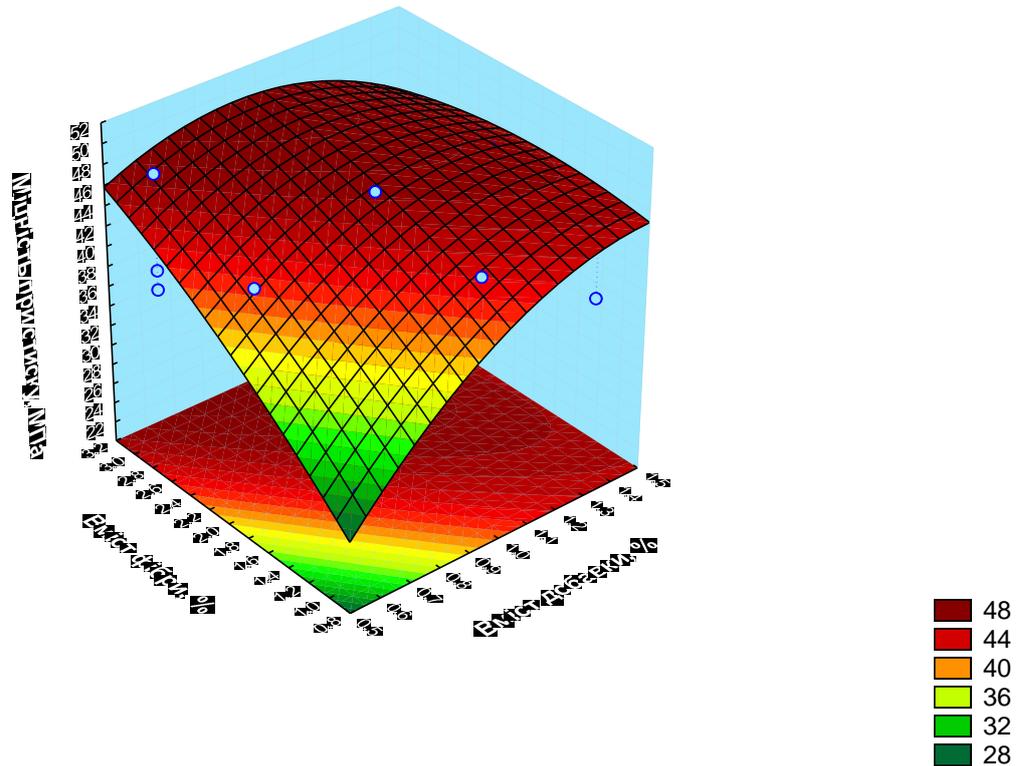


Рис. 5.7. Поверхня впливу вмісту фібри та добавки на міцність

З графіку видно, що з збільшенням вмісту волокна до 2% спостерігається тенденція до збільшення міцності при стиску. При подальшому збільшенні вмісту волокна міцність при стиску знижується. Це можна пояснювати тим, що волокна більшої довжини мають тенденцію до грудкування тим самим знижуючи однорідність розподілу його в об'ємі виробу. Ця картина тим більше чим більший вміст волокна в бетонній матриці.

Вміст пластифікуючої добавки має незначний вплив на міцність при стиску фібробетону. Максимальне значення міцності спостерігаємо при вмісті добавки 1% від маси цементу. Очевидно, що пластифікуюча добавка сприяє зниженню В/Ц відношення за рахунок зниження тертя між частинками складових бетону, що в свою чергу сприяє ущільненню бетону та підвищенню міцності при стиску.

5.3 Визначення середньої густини першої серії зразків

Для першої серії було визначено масу та об'єм кожного зразка і обраховано середню густину. Результати досліджень наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Результати визначення густини першої серії зразків

| № дослідю | Розміри, см | | | Об'єм, см ³ | Маса, г | Густина, г/см ³ | Густина, г/см ³ |
|-----------|-------------|-----|-----|------------------------|---------|----------------------------|----------------------------|
| | a | b | c | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 7 | 7 | 7.1 | 347.9 | 866 | 2.489 | 2.49 |
| | 6.9 | 7.1 | 7 | 342.9 | 856 | 2.496 | |
| | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 843 | 2.493 | |
| 2 | 7 | 7.1 | 7 | 347.9 | 846 | 2.432 | 2.45 |
| | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 836 | 2.473 | |
| | 7 | 7 | 7 | 343.0 | 841 | 2.452 | |
| 3 | 6.6 | 7 | 7 | 323.4 | 774 | 2.393 | 2.39 |
| | 7.3 | 6.9 | 7.1 | 357.6 | 854 | 2.388 | |
| | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 808 | 2.391 | |
| 4 | 7 | 7 | 7 | 343.0 | 828 | 2.414 | 2.40 |
| | 6.9 | 7 | 7.1 | 342.9 | 820 | 2.391 | |
| | 7 | 6.9 | 7 | 338.1 | 812 | 2.403 | |
| 5 | 6.8 | 7 | 7.1 | 337.9 | 854 | 2.527 | 2.47 |
| | 6.9 | 7 | 7.1 | 342.9 | 826 | 2.409 | |
| | 6.8 | 7 | 7 | 333.2 | 822 | 2.468 | |
| 6 | 6.9 | 6.9 | 7.1 | 338.0 | 841 | 2.488 | 2.49 |
| | 7 | 7 | 7.1 | 347.9 | 865 | 2.486 | |
| | 7 | 6.9 | 7 | 338.1 | 841 | 2.487 | |
| 7 | 7 | 7 | 7.1 | 347.9 | 840 | 2.414 | 2.38 |
| | 7 | 7.1 | 7.1 | 352.9 | 828 | 2.346 | |
| | 7 | 7 | 7.1 | 347.9 | 828 | 2.380 | |
| 8 | 7 | 6.9 | 7 | 338.1 | 775 | 2.292 | 2.30 |
| | 7 | 7 | 7 | 343.0 | 790 | 2.303 | |
| | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 777 | 2.298 | |
| 9 | 7 | 7.1 | 7 | 347.9 | 847 | 2.435 | 2.44 |
| | 6.8 | 7.1 | 7 | 337.0 | 825 | 2.441 | |
| | 7 | 7 | 7 | 343.0 | 836 | 2.438 | |
| 10 | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 845 | 2.499 | 2.47 |
| | 7 | 7 | 7.1 | 347.9 | 850 | 2.443 | |
| | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 836 | 2.471 | |
| 11 | 7.1 | 7.1 | 7 | 352.9 | 866 | 2.454 | 2.49 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|-----|-----|-----|-------|-----|-------|------|
| | 7 | 7 | 7 | 343.0 | 867 | 2.528 | |
| | 7.1 | 7.1 | 7 | 352.9 | 879 | 2.491 | |
| 12 | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 822 | 2.431 | 2.45 |
| | 6.9 | 6.9 | 7 | 333.3 | 824 | 2.472 | |
| | 6.9 | 6.9 | 7 | 333.3 | 817 | 2.452 | |
| 13 | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 829 | 2.452 | 2.47 |
| | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 842 | 2.490 | |
| | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 836 | 2.471 | |
| 14 | 6.6 | 7 | 7.1 | 328.0 | 790 | 2.408 | 2.42 |
| | 7.3 | 6.9 | 7.1 | 357.6 | 872 | 2.438 | |
| | 7.1 | 6.9 | 7 | 342.9 | 831 | 2.423 | |
| 15 | 6.9 | 7.1 | 7.2 | 352.7 | 834 | 2.364 | 2.44 |
| | 6.9 | 6.9 | 7 | 333.3 | 839 | 2.517 | |
| | 6.9 | 7 | 7 | 338.1 | 825 | 2.441 | |

Для отримання функції відгуку програма STATISTICA розраховує коефіцієнти регресії (таблиця 5.7).

Таблиця 5.7

Коефіцієнти рівняння регресії визначення густини

| Фактор | Регрессия; R-кв.=.90558;Скор.0. (В процентах.sta) 3 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=.00405 ЗП: Густина, г/см3 | | | | | |
|---------------------------|---|--------|--------|-------|-------------------|-------------------|
| | Регрес. Коэф. | Ст.Ош. | t(1) | p | -95.% Дов.Пред | +95.% Дов.Пред |
| Сред/Св.член | -0.0224 | 2.545 | -0.009 | 0.994 | -32.364 | 32.320 |
| (1)Довжина волокна, мм(L) | 0.1413 | 0.180 | 0.783 | 0.577 | -2.151 | 2.434 |
| Довжина волокна, мм(Q) | -0.0021 | 0.003 | -0.791 | 0.574 | -0.035 | 0.031 |
| (2)Вміст фібри, %(L) | 2.0306 | 3.093 | 0.657 | 0.630 | -37.265 | 41.327 |
| Вміст фібри, %(Q) | -0.4172 | 0.767 | -0.544 | 0.683 | -10.165 | 9.331 |
| (3)Вміст добавки, %(L) | 0.2556 | 1.182 | 0.216 | 0.864 | -14.767 | 15.278 |
| Вміст добавки, %(Q) | 0.0312 | 0.487 | 0.064 | 0.959 | -6.158 | 6.221 |
| 1L на 2L | -0.1197 | 0.191 | -0.628 | 0.643 | -2.542 | 2.303 |
| 1L на 2Q | 0.0258 | 0.047 | 0.545 | 0.682 | -0.575 | 0.627 |
| 1Q на 2L | 0.0017 | 0.003 | 0.631 | 0.642 | -0.033 | 0.036 |
| 1Q на 2Q | -0.0004 | 0.001 | -0.550 | 0.680 | -0.009 | 0.008 |
| 1L на 3L | -0.0108 | 0.041 | -0.262 | 0.837 | -0.533 | 0.511 |
| 1Q на 3L | 0.0002 | 0.001 | 0.301 | 0.814 | -0.007 | 0.008 |
| 2L на 3L | -0.0500 | 0.080 | -0.629 | 0.643 | -1.061 | 0.961 |

В результаті обрахунків отримуємо наступне рівняння регресії для визначення густини зразків:

$$y = -0,0224 + 0,141x_1 - 0,002x_1^2 + 2,0306x_2 - 0,4172x_2^2 + 0,2556x_3 + 0,0312x_3^2 - 0,1197x_1x_2 + 0,0258x_1x_2^2 + 0,0017x_1^2x_2 - 0,0004x_1^2x_2^2 - 0,0108x_1x_3 - 0,0002x_1^2x_3 - 0,05x_2x_3 \quad (5.3)$$

За даними таблиці 5.1 будуюмо діаграми маргінальних середніх, розглядаючи вплив кожного з факторів окремо на густину сталевібробетонних зразків (рис. 5.8 – рис. 5.10).

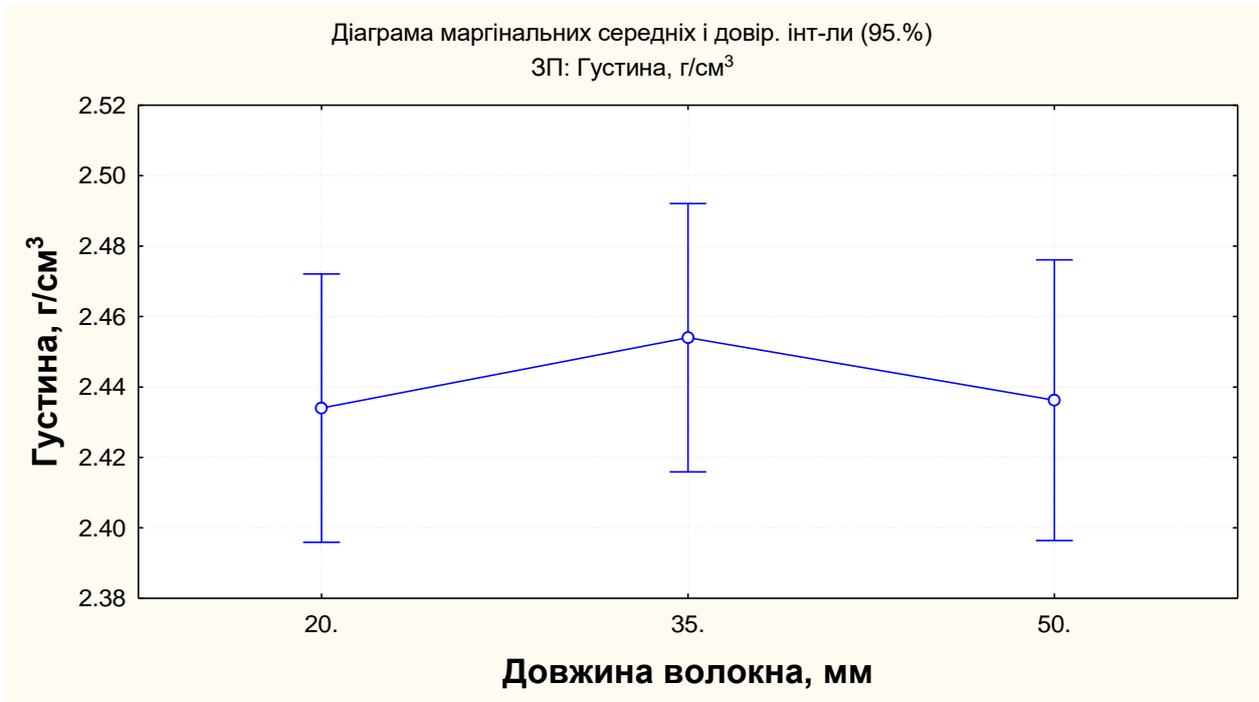


Рис. 5.8. Діаграма маргінальних середніх залежності густини від довжини волокна

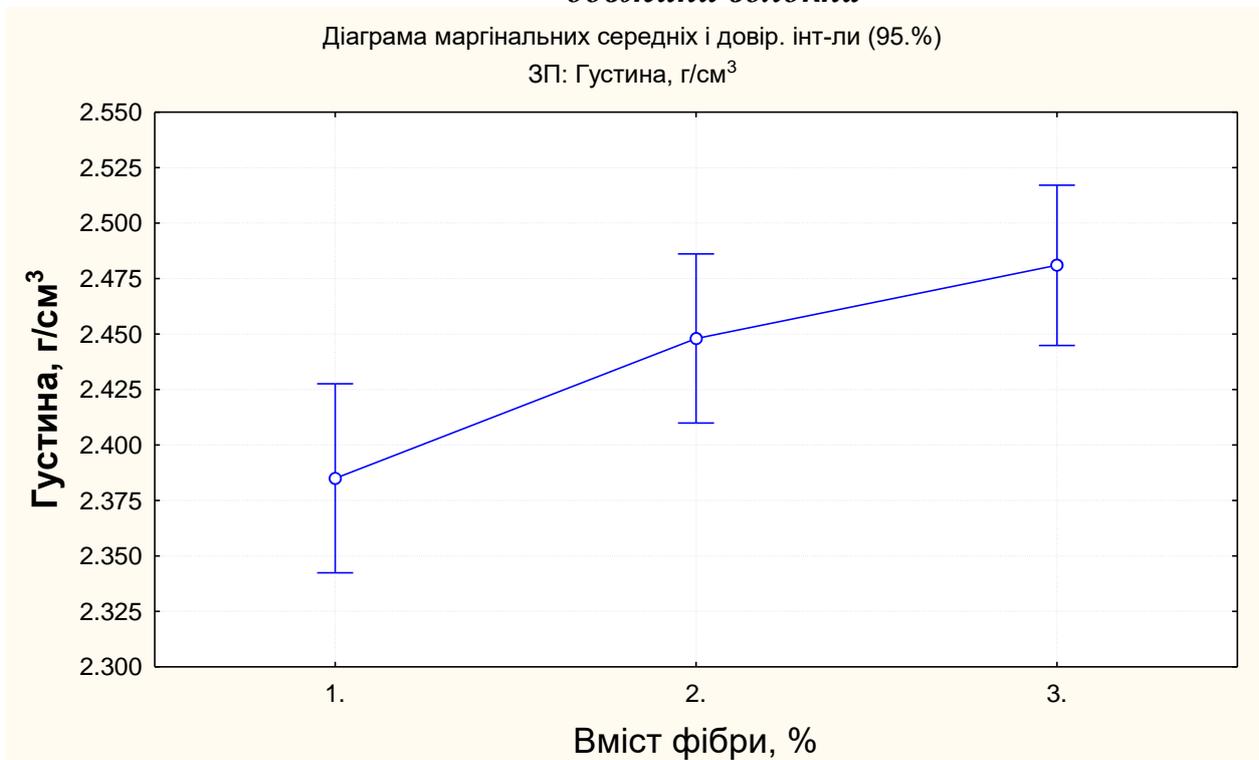


Рис. 5.9. Діаграма маргінальних середніх залежності густини від вмісту фібри

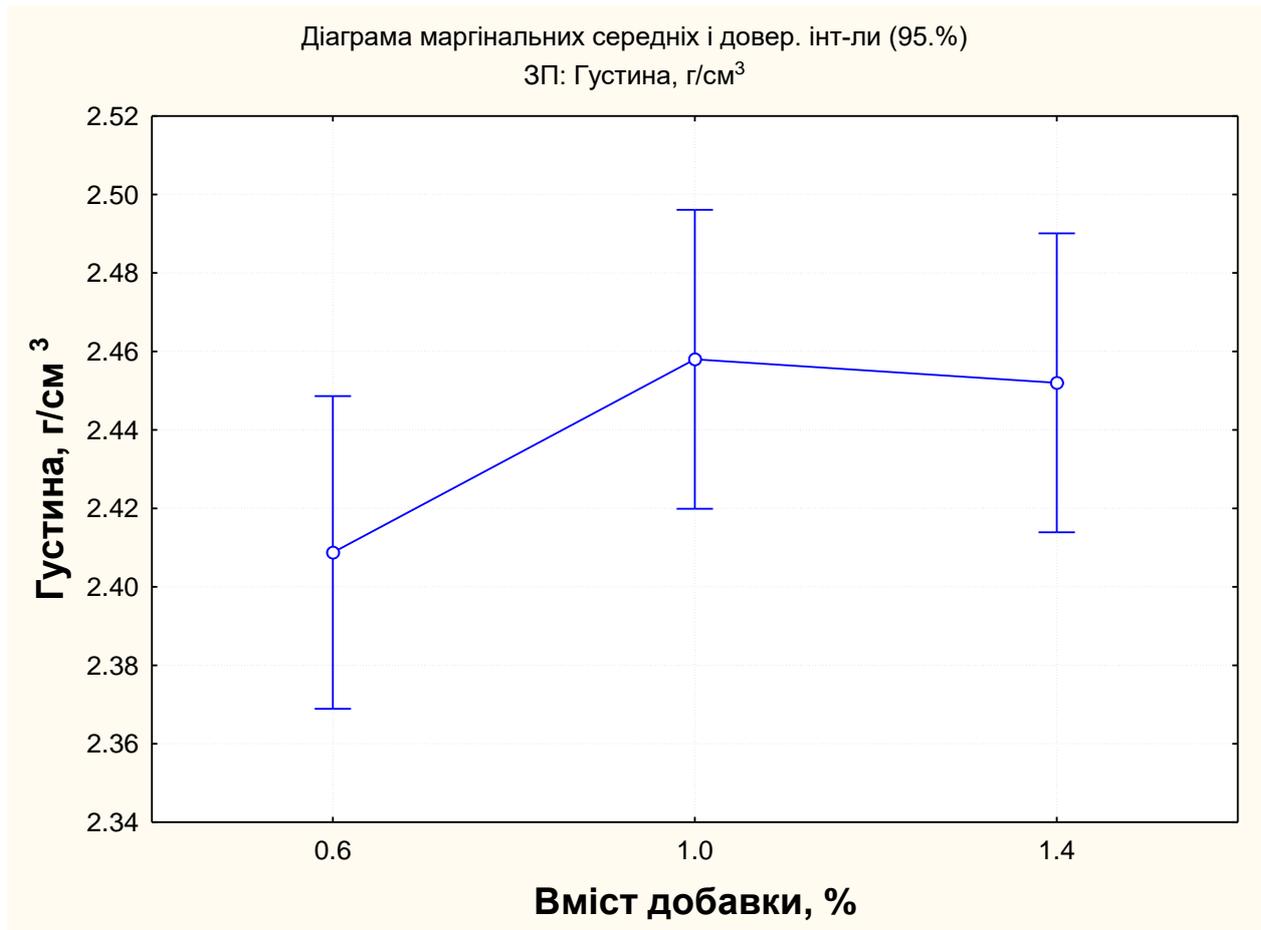


Рис. 5.10. Діаграма маргінальних середніх залежності густини від вмісту добавки

Розглянувши діаграми маргінальних середніх робимо наступні висновки:

- оптимальна довжина волокна становить 35 мм;
- зі збільшенням вмісту фібри помітно підвищуються показники густини сталевібробетону (рис. 5.9), що обумовлено тим, що при введенні більшої кількості фібри змінюється маса виробу, а об'єм залишається не змінним, і це призводить до збільшення густини виробу;

- з рисунку 5.10 наочно видно, що вміст добавки в 1 % та 1,4 % має більший вплив на густину сталевібробетону, ніж 0,6 %, що обумовлено тим, що мала кількість пластифікатора недостатня для належного формування, тому можливе утворення значної кількості пор та пустот в середині зразка.

В таблиці 5.8 наведено вплив факторів на густину сталевібробетону.

Кореляція факторів

| Фактор | Густина, г/см ³ |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Довжина волокна, мм (X_1) | 0.00 |
| Довжина волокна, мм (X_1^2) | 0.18 |
| Вміст фібри, % (X_2) | 0.63 |
| Вміст фібри, % (X_2^2) | 0.10 |
| Вміст добавки, % (X_3) | 0.31 |
| Вміст добавки, % (X_3^2) | 0.23 |
| X_1 на X_2 | -0.40 |
| X_1 на X_3 | -0.15 |
| X_2 на X_3 | 0.09 |

Аналізуючи вище наведені дані зауважимо, що довжина волокна не має впливу на густина, а з карти Парето видно, що найбільший вплив має саме вміст фібри (рис. 5.11).

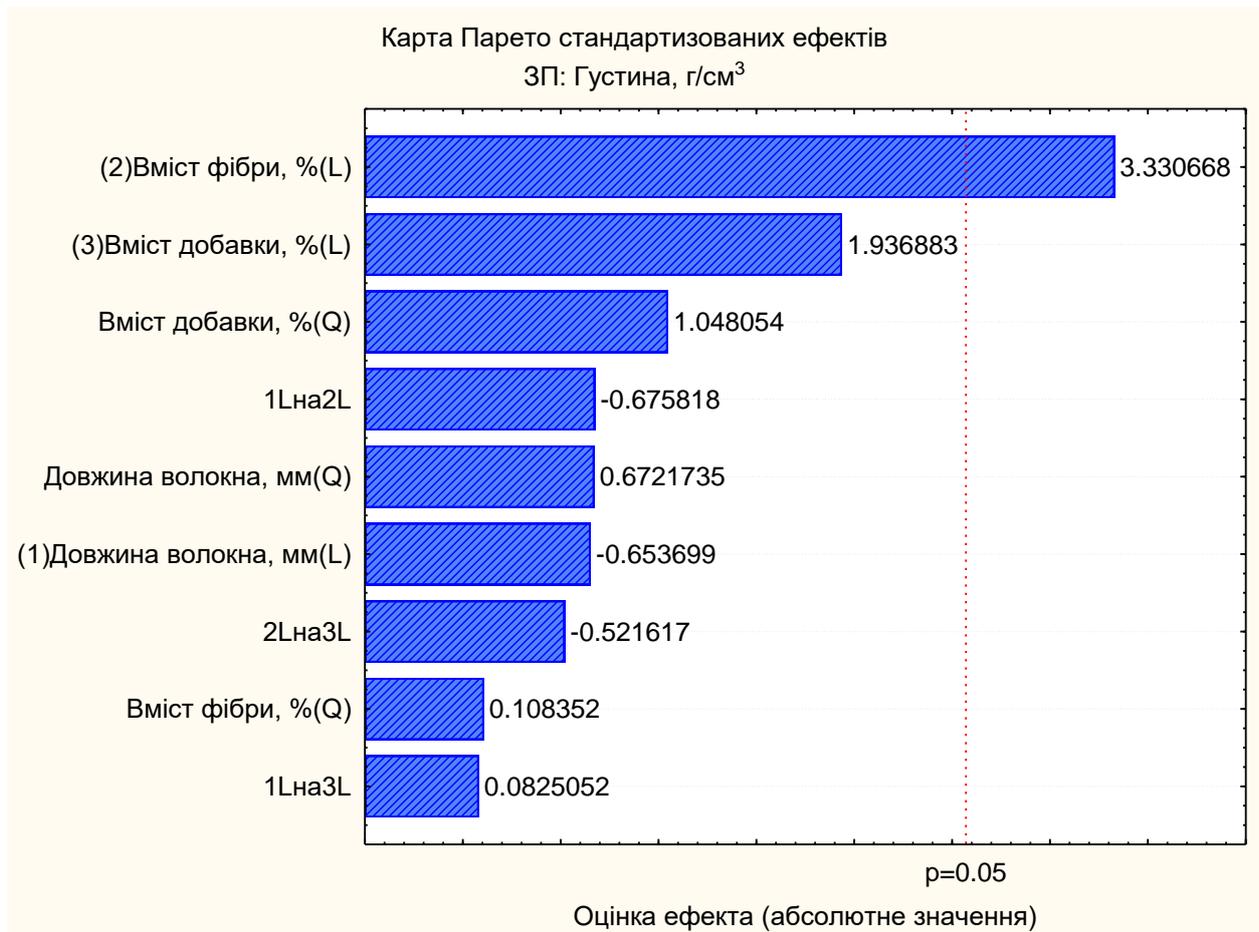


Рис. 5.11. Карта Парето стандартизованих ефектів; змінна: густина,

г/см³
На рисунку 5.12 наведено поверхню впливу двох факторів X_1 та X_2 (довжини волокна та вмісту фібри) на густина сталевібробетону при 1% вмісту

добавки. Наочно ми можемо спостерігати, що вплив вмісту фібри має прямо пропорційний характер дії на густину: чим більший вміст волокна, тим більше значення густини. На рисунку 5.13 спостерігаємо вплив вмісту фібри та добавки на густину. Розглядаючи дану поверхню, ми наочно можемо спостерігати вплив 0,6% добавки, що зображений зеленим кольором. Отже, для одержання необхідного показника густини сталевібробетону, необхідно коригувати вміст фібри та пластифікатора; оптимальний вміст пластифікатора становить 1% за об'ємом. На рисунку 5.14 наведено поверхню впливу довжини волокна та добавки на густину виробу.

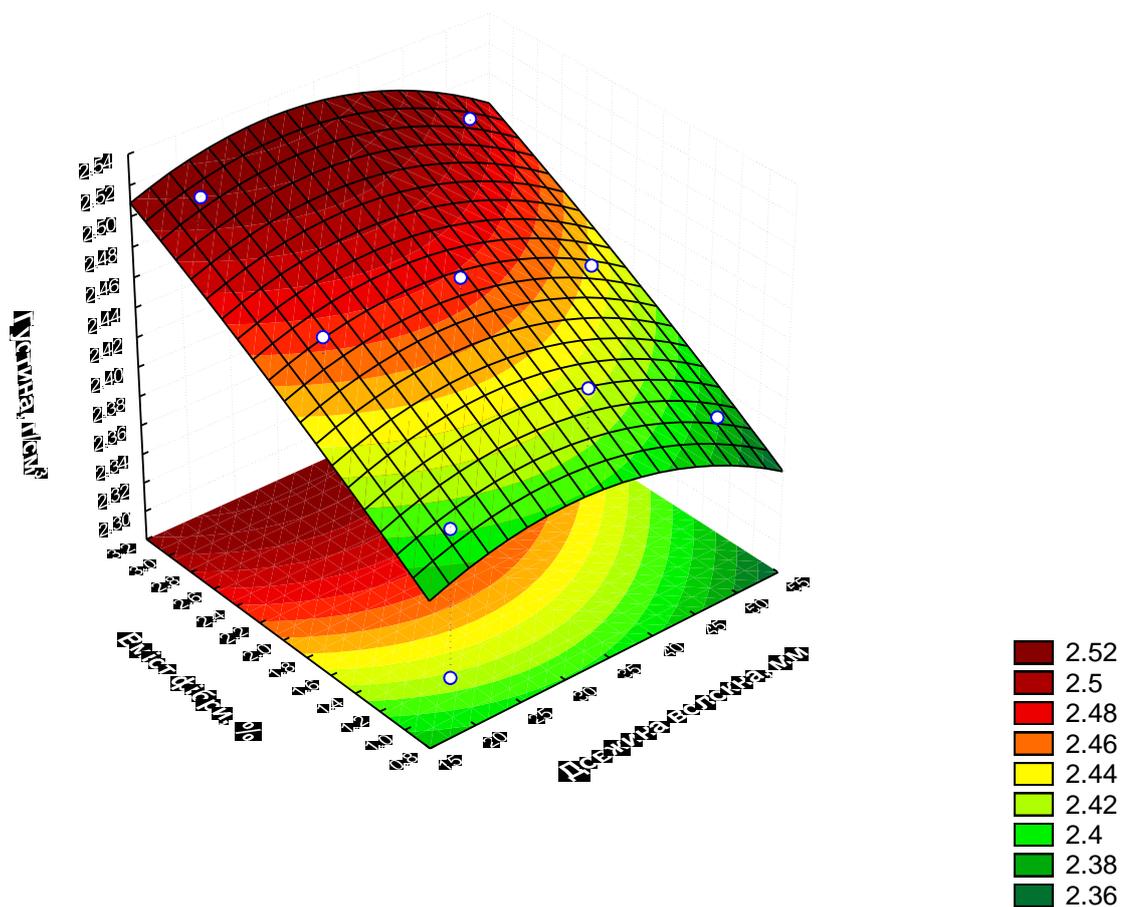


Рис. 5.12. Поверхня впливу довжини волокна та вмісту фібри на густину сталевібробетону

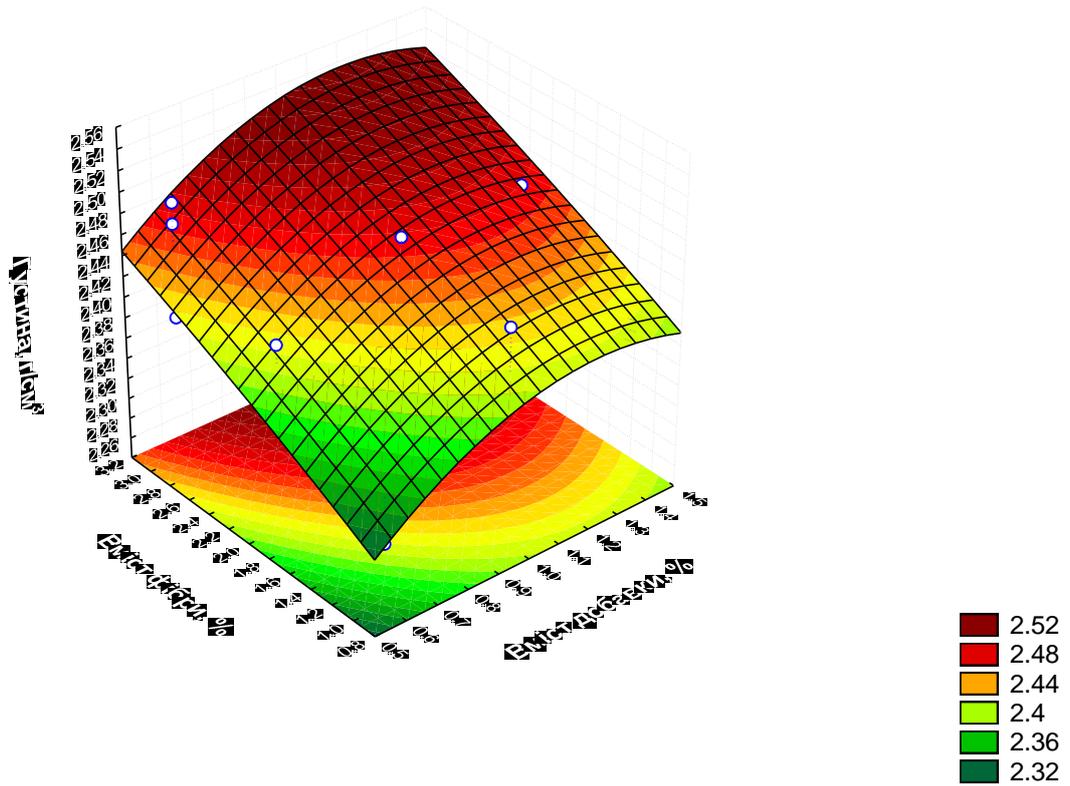


Рис. 5.13. Поверхня впливу вмісту фібри та пластифікатора на густину сталевібробетону

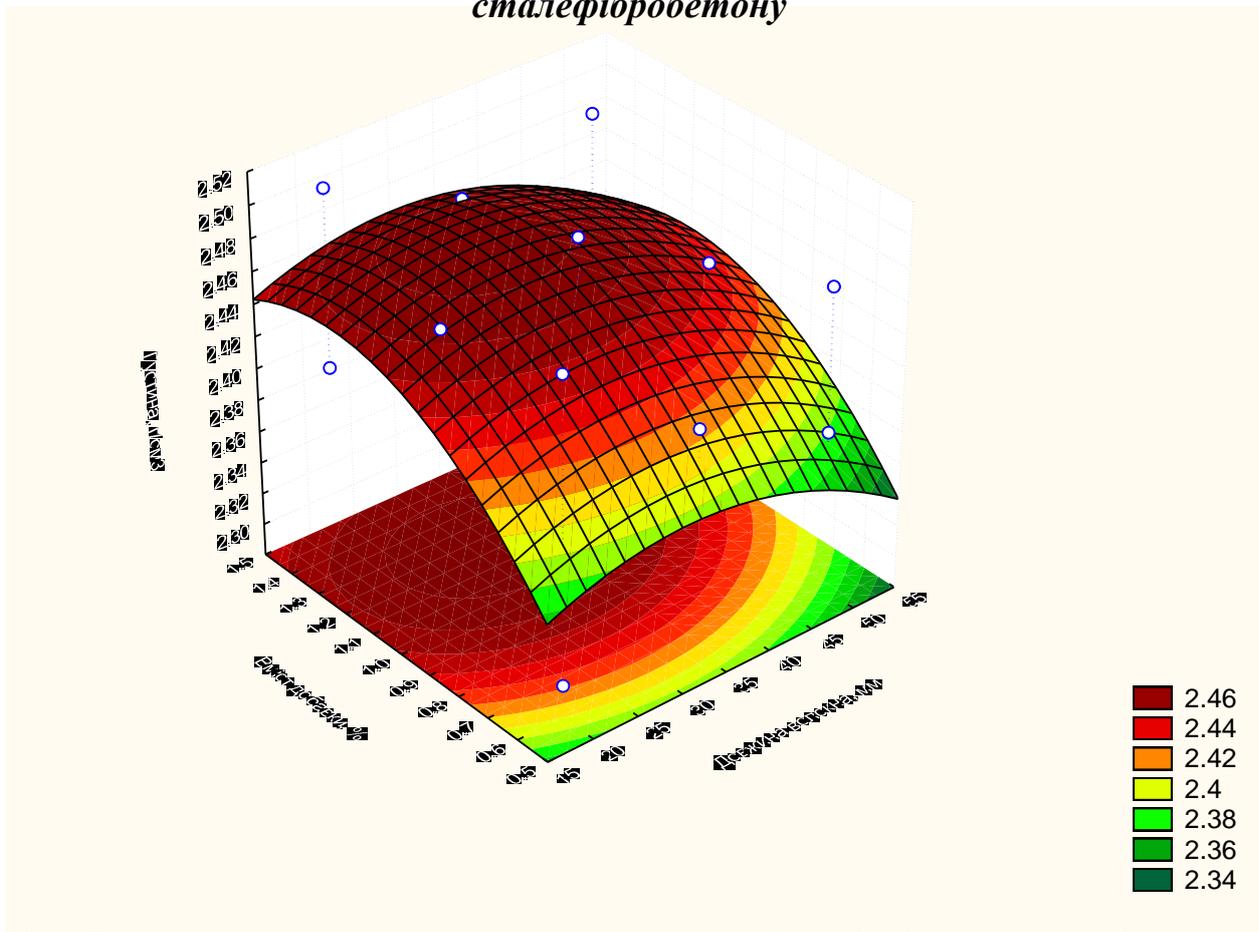


Рис. 5.14. Поверхня впливу довжини волокон та вмісту добавки на середню густину сталевібробетону

5.4 Міцність композитів при згині

Другу серію зразків, в кількості 15 призм, випробували на чотирьох точковий згин (рис. 5.15).

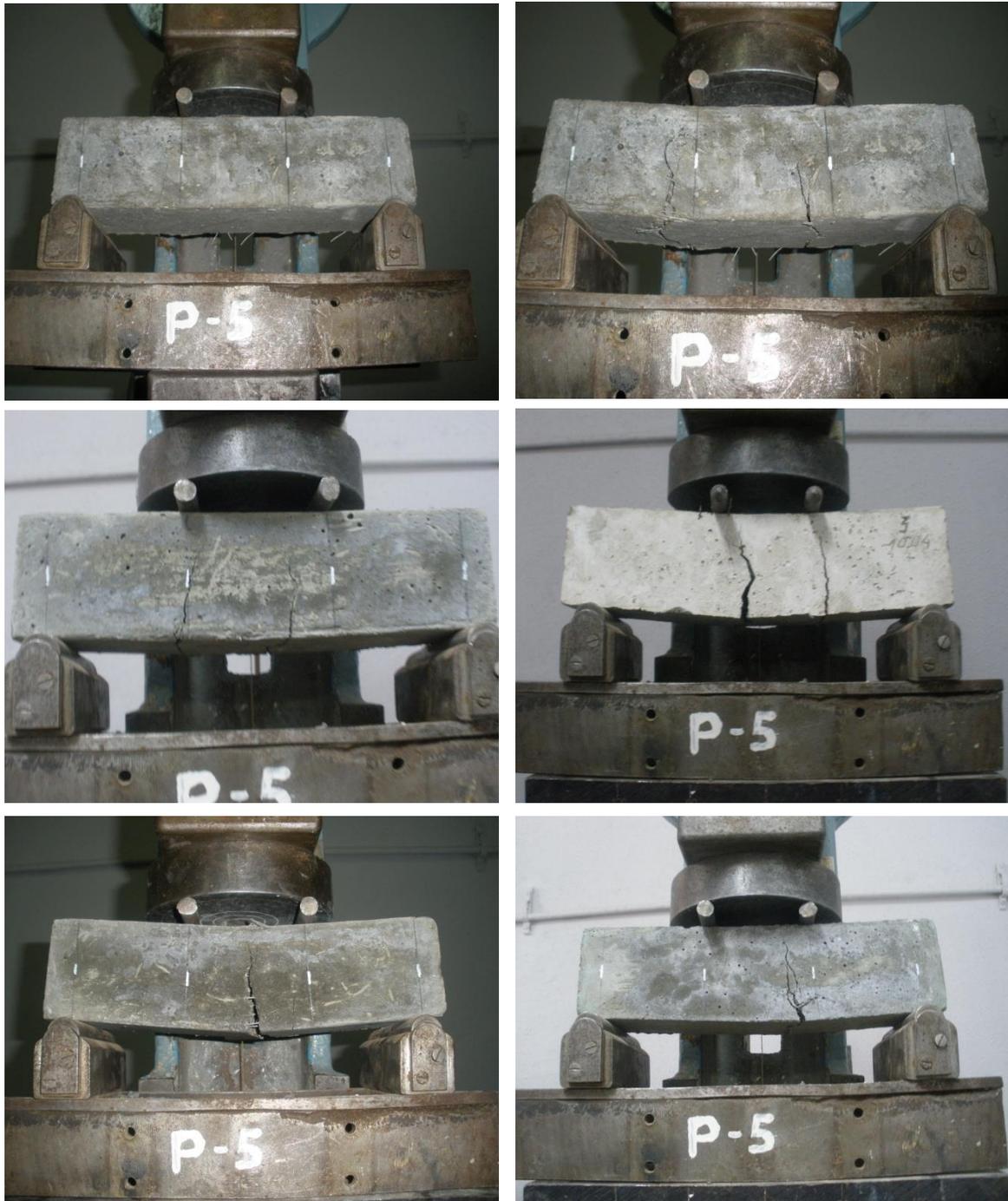


Рис. 5.15. Випробування призм на чотирьох точковий згин

Отримавши результати випробувань вибраних точок плану експерименту, була проведена інтерполяція даних для всього плану. Дані наведені в таблицях 5.9 – 5.10.

Таблиця 5.9

Результати випробувань обраних точок

| № дослідю | Навантаження, кгс | Середнє, кгс | Міцність, кгс/см ² | Міцність, МПа |
|-----------|-------------------|--------------|-------------------------------|---------------|
| 1 | 2160 | 2180 | 131.18 | 13.12 |
| | 2200 | | | |
| | 2180 | | | |
| 2 | 1150 | 1225 | 73.71 | 7.37 |
| | 1300 | | | |
| | 1225 | | | |
| 3 | 1300 | 1335 | 80.33 | 8.03 |
| | 1370 | | | |
| | 1335 | | | |
| 4 | 850 | 855 | 51.45 | 5.14 |
| | 860 | | | |
| | 855 | | | |
| 5 | 1500 | 1560 | 93.87 | 9.39 |
| | 1620 | | | |
| | 1560 | | | |

Таблиця 5.10

Результати випробувань для всіх точок

| План експерименту (X _i) | | | Міцність при згині, МПа |
|-------------------------------------|----------------|----------------|-------------------------|
| X ₁ | X ₂ | X ₃ | |
| 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | 1 | 13.12 |
| -1 | 1 | 1 | 7.37 |
| 1 | -1 | 1 | 8.03 |
| -1 | -1 | 1 | 5.14 |
| 1 | 1 | -1 | 13.07 |
| -1 | 1 | -1 | 7.22 |
| 1 | -1 | -1 | 7.91 |
| -1 | -1 | -1 | 4.82 |
| 1 | 0 | 0 | 10.66 |
| -1 | 0 | 0 | 8.00 |
| 0 | 1 | 0 | 9.55 |
| 0 | -1 | 0 | 8.26 |
| 0 | 0 | 1 | 8.43 |
| 0 | 0 | -1 | 8.34 |
| 0 | 0 | 0 | 9.39 |

Для отримання функції відгуку програма STATISTICA розраховує коефіцієнти регресії (табл.. 5.11).

Коефіцієнти рівняння регресії визначення міцності при згині

| Фактор | Регрессия; R-кв.=.82757;Скор.0. (В процентах.sta) 3 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=13.3128 ЗП: Міцність при згині, МПа | | | | | |
|---------------------------|---|---------|--------|-------|-------------------|-------------------|
| | Регрес. Коеф. | Ст.Ош. | t(1) | p | -95.% Дов.Пред | +95.% Дов.Пред |
| Сред/Св.член | -25.1410 | 145.935 | -0.172 | 0.891 | -1879.42 | 1829.14 |
| (1)Довжина волокна, мм(L) | 1.4636 | 10.343 | 0.142 | 0.911 | -129.96 | 132.89 |
| Довжина волокна, мм(Q) | -0.0217 | 0.150 | -0.145 | 0.909 | -1.93 | 1.88 |
| (2)Вміст фібри, %(L) | 13.0814 | 177.313 | 0.074 | 0.953 | -2239.89 | 2266.05 |
| Вміст фібри, %(Q) | -1.8263 | 43.985 | -0.042 | 0.974 | -560.71 | 557.05 |
| (3)Вміст добавки, %(L) | 18.7510 | 67.787 | 0.277 | 0.828 | -842.56 | 880.06 |
| Вміст добавки, %(Q) | -6.2888 | 27.929 | -0.225 | 0.859 | -361.16 | 348.59 |
| 1L на 2L | -0.5847 | 10.930 | -0.053 | 0.966 | -139.46 | 138.29 |
| 1L на 2Q | 0.0626 | 2.713 | 0.023 | 0.985 | -34.41 | 34.53 |
| 1Q на 2L | 0.0082 | 0.157 | 0.053 | 0.967 | -1.98 | 2.00 |
| 1Q на 2Q | -0.0007 | 0.039 | -0.018 | 0.989 | -0.49 | 0.49 |
| 1L на 3L | -0.4369 | 2.355 | -0.186 | 0.883 | -30.36 | 29.49 |
| 1Q на 3L | 0.0077 | 0.034 | 0.225 | 0.859 | -0.43 | 0.44 |
| 2L на 3L | -0.1129 | 4.561 | -0.025 | 0.984 | -58.06 | 57.84 |

При цьому рівняння регресії набуває наступного вигляду:

$$y = -25,1410 + 1,4636x_1 - 0,0217x_1^2 + 13,0814x_2 - 1,8263x_2^2 + 18,7510x_3 - 6,2888x_3^2 - 0,5847x_1x_2 + 0,0626x_1x_2^2 + 0,0082x_1^2x_2 - 0,0007x_1^2x_2^2 - 0,4369x_1x_3 + 0,0077x_1^2x_3 - 0,1129x_2x_3. \quad (5.4)$$

За даними таблиці 5.1 будемо діаграми маргінальних середніх, розглядаючи вплив кожного з факторів окремо на міцність при згині сталевібробетонних зразків (рис. 5.16 – рис. 5.18).

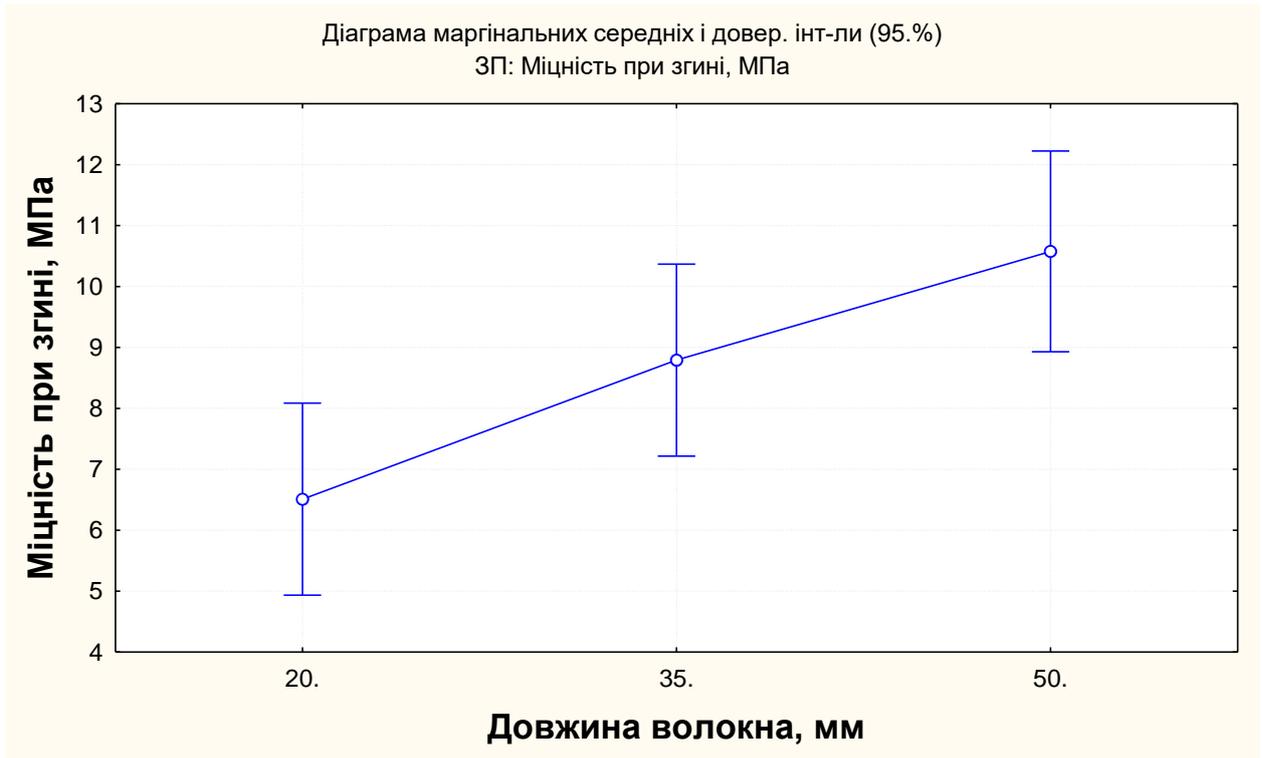


Рис. 5.16. Діаграма маргінальних середніх залежності міцності при згині від довжини волокна

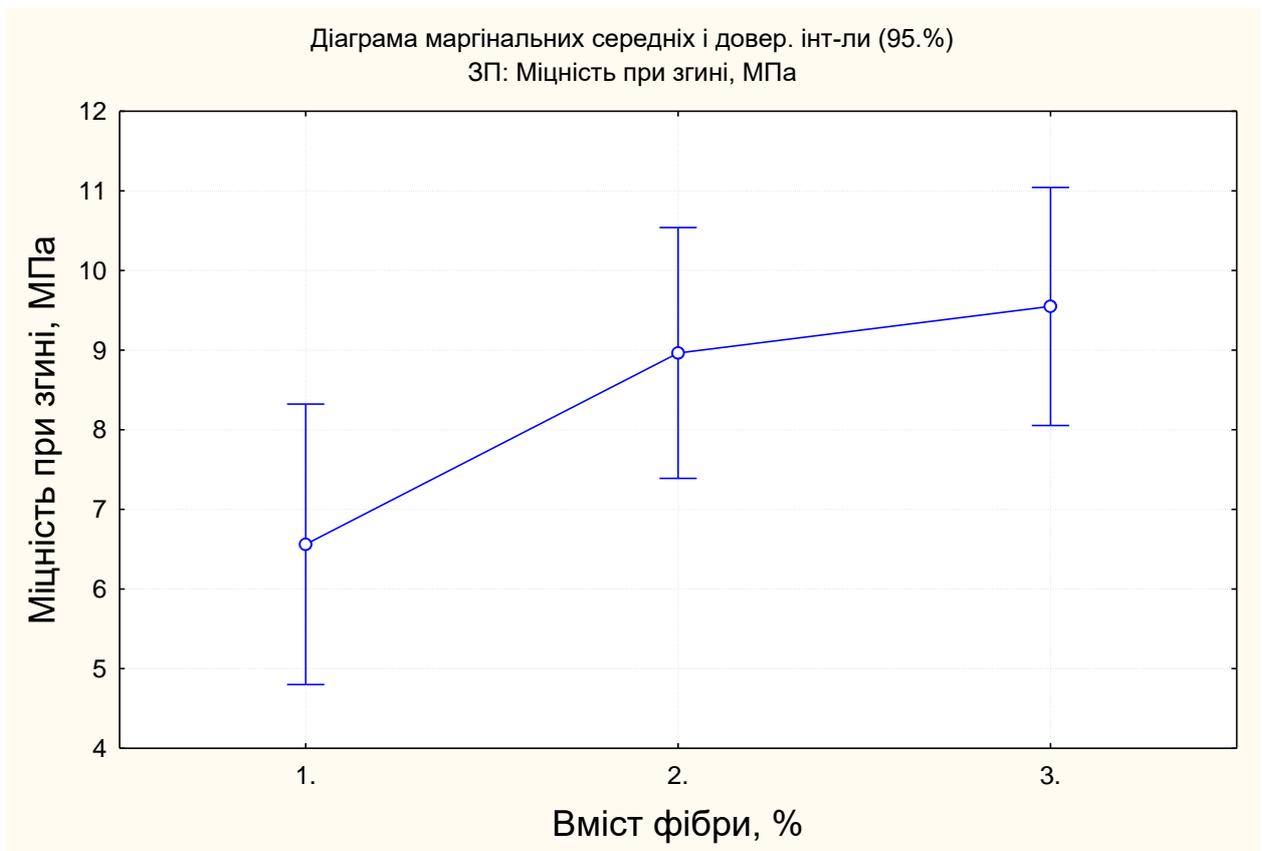


Рис. 5.17. Діаграма маргінальних середніх залежності міцності при згині від вмісту фібри

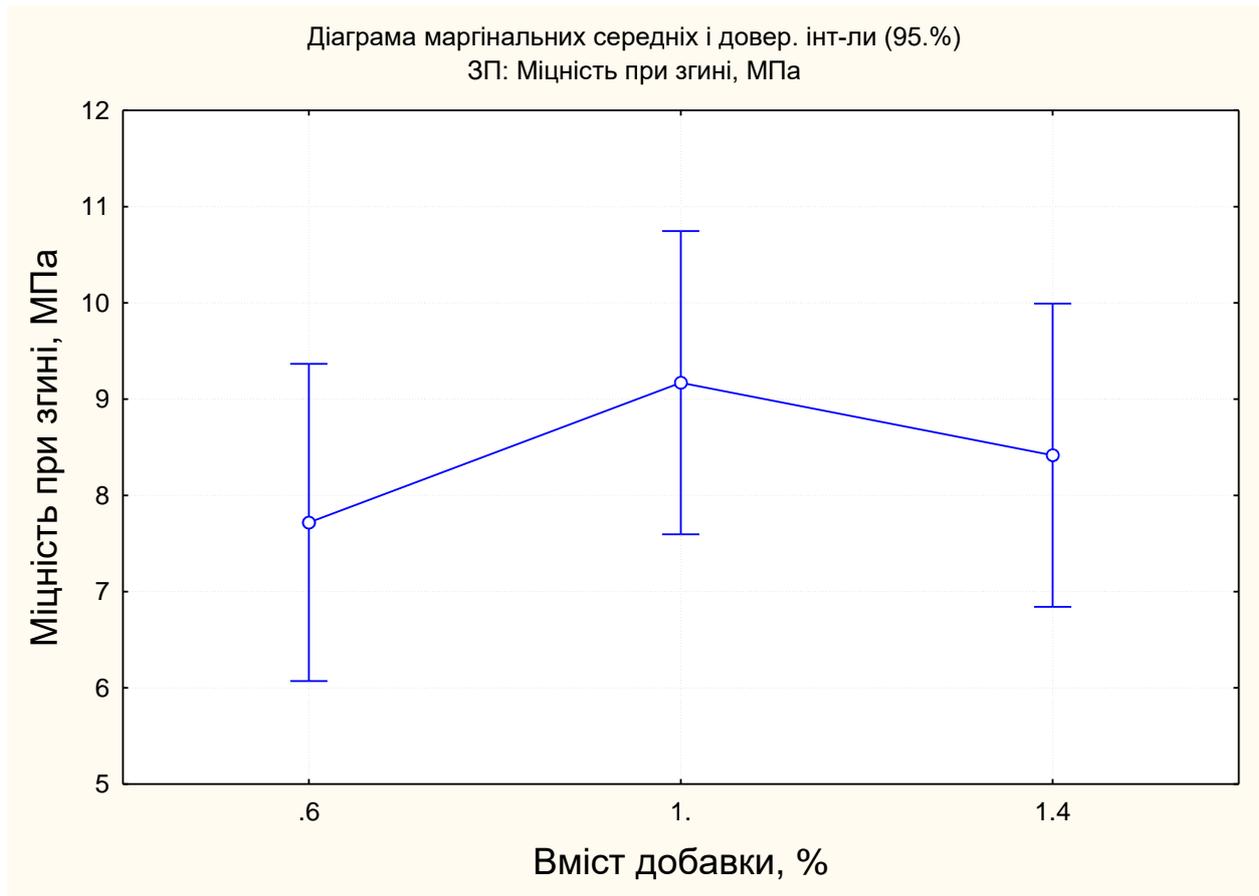


Рис. 5.18. Діаграма маргінальних середніх залежності міцності при згині від вмісту добавки

Розглянувши діаграми маргінальних середніх робимо наступні висновки:

- зі збільшенням довжини волокна від 20 до 50 мм, спостерігається явне підвищення міцності при згині; це відбувається через те, що довші волокна, що потрапляють до зони утворення тріщини, стримують її, в результаті чого спостерігається розрив волокна, а не його висмикування;

- з рисунку 5.16 видно, що вміст 2% та 3% фібри відповідає більшій межі міцності при згині, ніж 1%, так як в зону утворення тріщини потрапляє більша кількість волокна, що стримує її;

- оптимальний вміст добавки складає 1%.

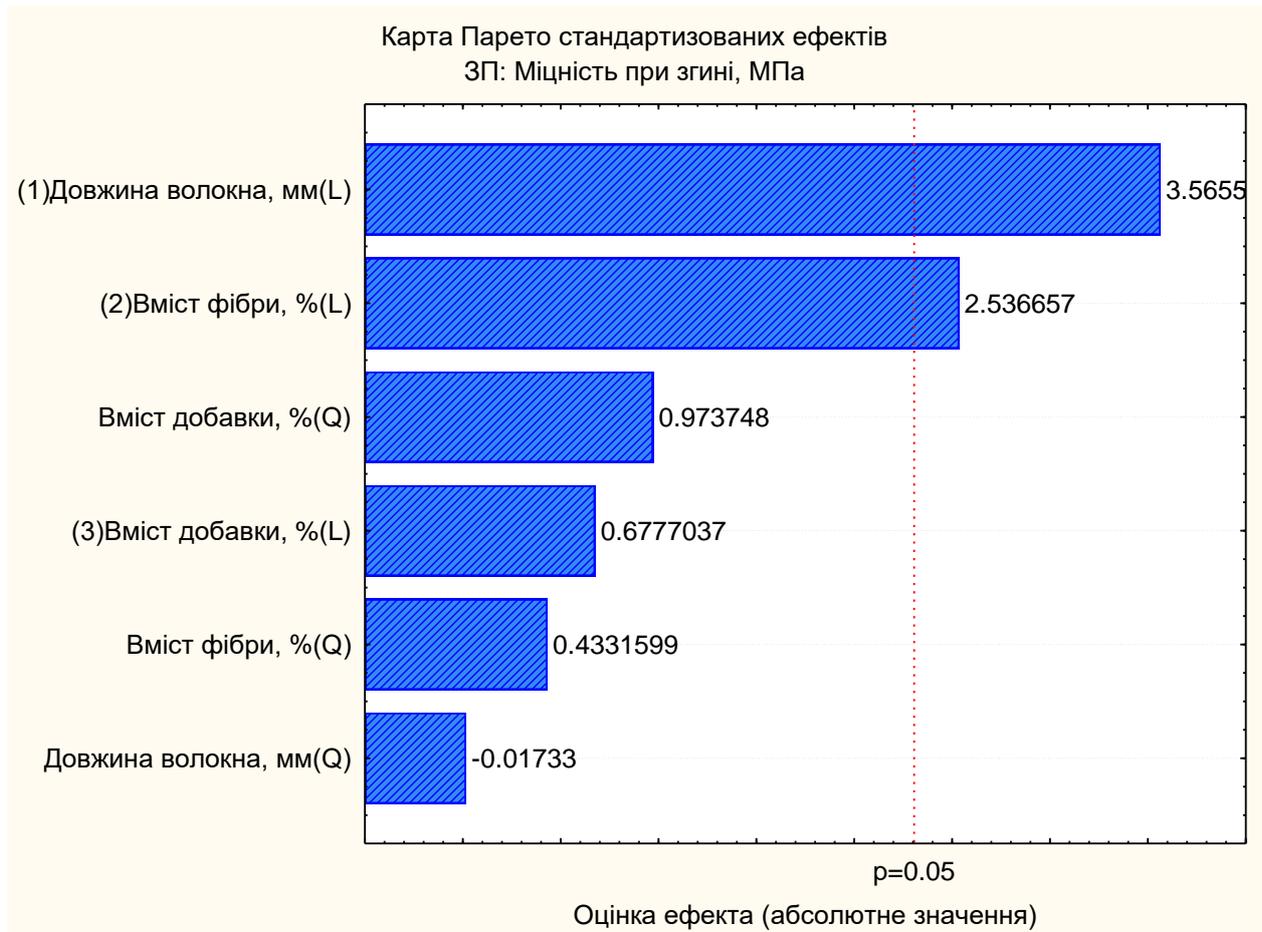
В таблиці 5.12 наведено вплив факторів на міцність при згині сталевібробетону.

Таблиця 5.12

Кореляція факторів

| Фактор | Міцність при згині, МПа |
|---------------------------------|--------------------------------|
| Довжина волокна, мм (X_1) | 0.73 |
| Довжина волокна, мм (X_1^2) | 0.05 |
| Вміст фібри, % (X_2) | 0.54 |
| Вміст фібри, % (X_2^2) | 0.11 |
| Вміст добавки, % (X_3) | 0.03 |
| Вміст добавки, % (X_3^2) | 0.17 |
| X_1 на X_2 | 0.17 |
| X_1 на X_3 | -0.01 |
| X_2 на X_3 | 0.05 |

Аналізуючи таблицю 5.12 можемо зробити висновок, що найбільший вплив на міцність при згині матиме довжина волокна (0,73) та вміст фібри (0,54). Вміст добавки не є дуже значним фактором в даному експерименті, так як його кореляція становить $0,03 < 0,09$. Ці ж висновки робимо, розглянувши карту Парето (рис. 5.19).



**Рис. 5.19. Карта Парето стандартизованих ефектів;
змінна: міцність при згині, МПа**

На рисунку 5.20 наведена поверхня впливу факторів X_1 та X_2 (довжини волокна та вмісту фібри) на міцність при згині при сталому вмісті добавки в 1%. Розглянувши дану поверхню робимо висновок, що вплив даних факторів на міцність при згині має прямопропорційну залежність, тобто при їх зростанні спостерігається тенденція до збільшення міцності при згині. Максимального значення міцності при згині (13,12 МПа) зразки набувають при $X_1 = 50$ мм, $X_2 = 3\%$, а мінімального (4,82 МПа) - при $X_1 = 20$ мм, $X_2 = 1\%$. З рисунку 5.21 видно, що вміст пластифікатора має незначний вплив і пік значень припадає на 1%.

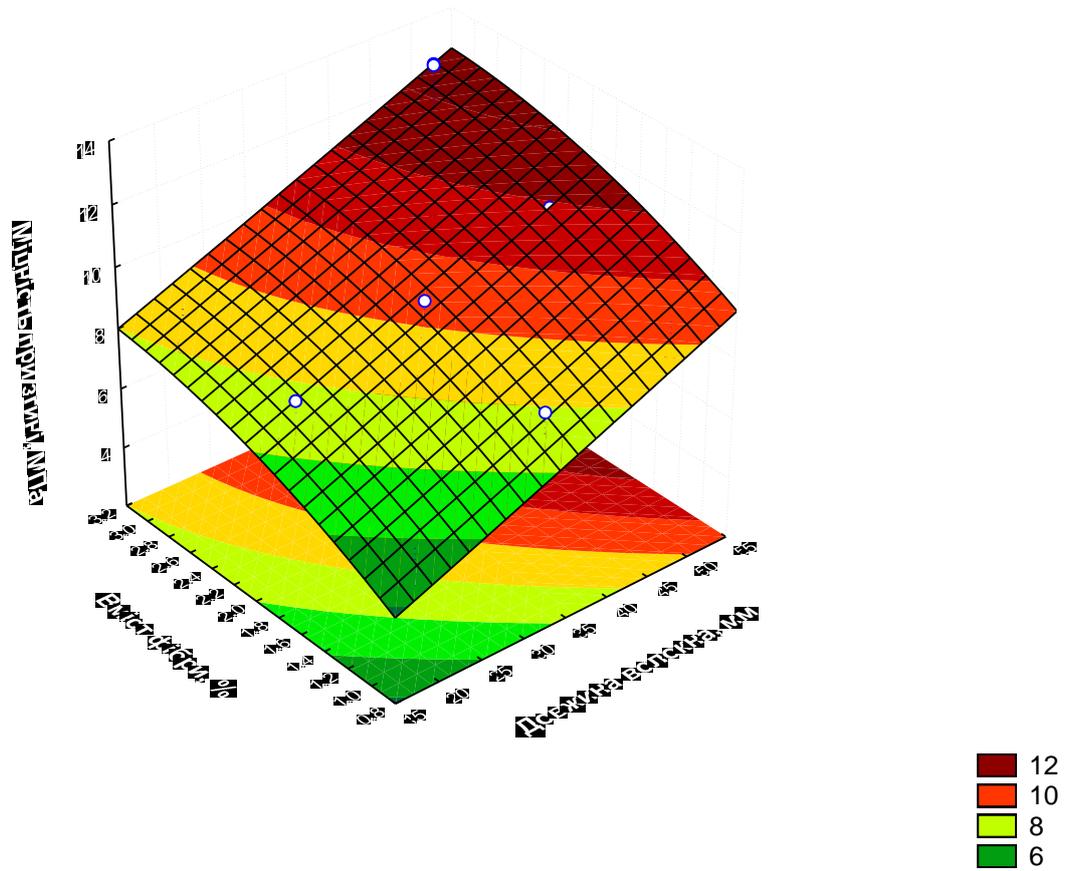


Рис. 5.20. Поверхня впливу довжини волокна та вмісту фібри на міцність при згині

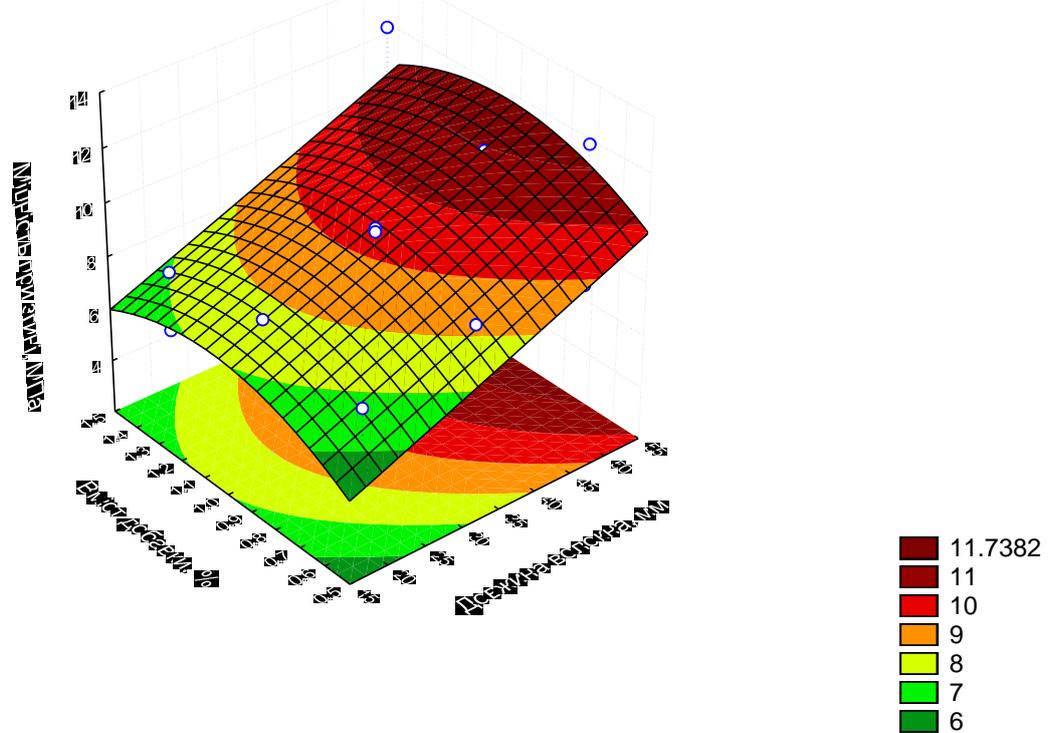


Рис. 5.21. Поверхня впливу довжини волокна та вмісту добавки на міцність при згині

5.6 Результати випробувань тріщиностійкості

Тріщиностійкість є однією з найважливіших характеристик, що визначають довговічність виробів та конструкцій. Для бетонних та ж/бетонних конструкцій, що експлуатуються у складних умовах, динамічних впливів тріщиностійкість бетону відіграє важливу роль у забезпеченні надійності конструкцій.

Нами коефіцієнт інтенсивності напруги (КІН) обчислювався трьома методами. Для визначення КІН за методом Брауна випробовувалися зразки-балочки розмірами 7x7x28 см на вигин. За цією методикою КІН знаходиться у безпосередній залежності від межі міцності при згинанні і незначно змінюється залежно від глибини надрізу. Обчислення проводилися за рівнянням (3.7).



Рис 5.22. Зразки при випробуваннях на вигин

Коефіцієнт інтенсивності напруги (КІН) визначався так само за рівнянням (3.4) для множинного руйнування волокнистих композитів з висмикуванням волокна.

Крім того, для оцінки тріщиностійкості визначалася сила просування тріщини G за методикою, описаною вище. Обчислення проводилися за рівнянням (3.3).



Рис. 5.23. Загальний вигляд плити під час випробувань

За результатами випробувань плит на ширину розкриття тріщини були побудовані криві податливості, причому по осі ординат відкладалася податливість зразка, а по осі абсцис - напівдовжина тріщини (рис. 5.24).

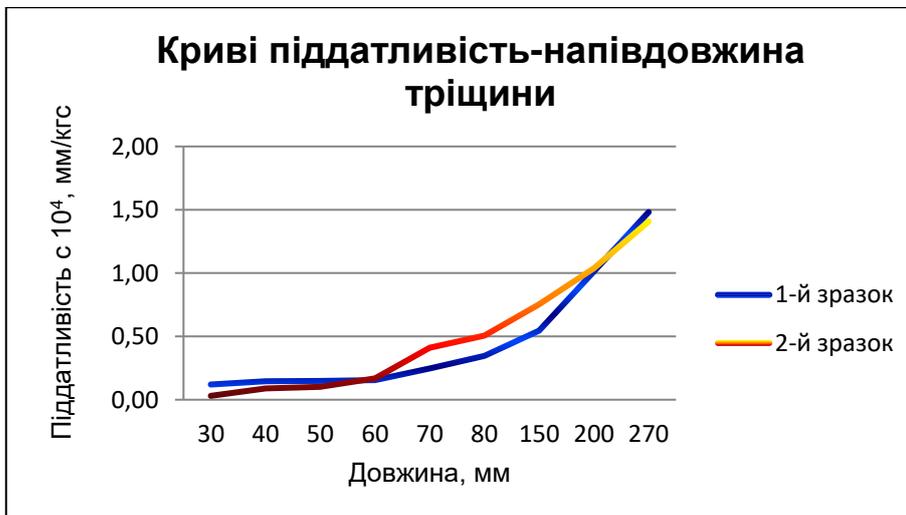


Рис. 5.22. Криві залежності піддатливості від напівдовжини утвореної тріщини

За нахилом дотичної до осі абсцис визначали параметр dc/dA . Потім знаючи модуль пружності композицій, визначених заздалегідь, обчислювали коефіцієнт інтенсивності напруги. КІН визначений за цією методикою на 10-15% вище, ніж

обчислений за рівнянням (3.4). Зі збільшенням довжини розкриття тріщини в'язкість руйнування збільшується, що видно на графіку (рис 5).

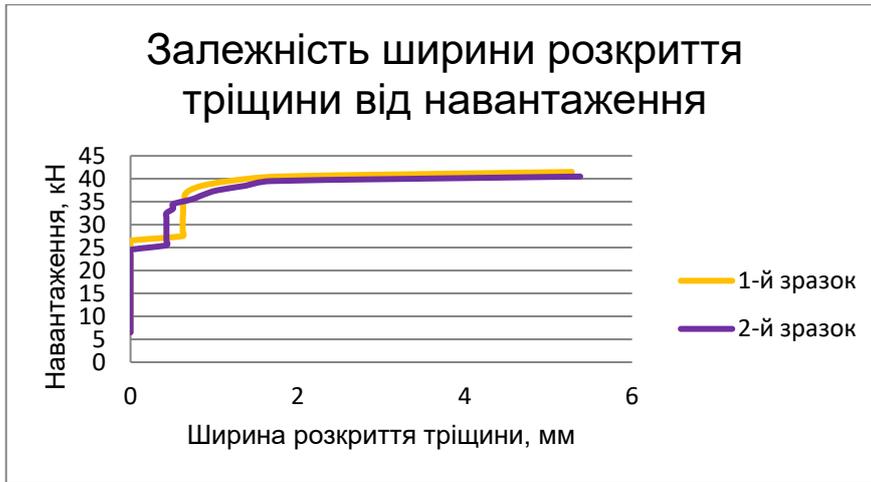


Рис. 5.23. Криві залежності ширини розкриття тріщини від прикладеного навантаження

Очевидно, зі збільшенням довжини тріщини кількість волокон-стрингерів, що стягують краї тріщини, підвищується. На подолання напруги тертя на поверхні розділу витрачається додаткова енергія, що й видно з графіків рис. Ці кривим властива одна закономірність - початкова пряма ділянка, що свідчить про миттєве вивільнення пружної енергії. Крутий підйом кривої після прямої ділянки є показником кількості навантаження, необхідної для компенсації дисипативних втрат енергії.

У досліджених фібробетонах довжина волокна в 2 – 3 рази менша від критичної довжини волокна, обчисленої з урахуванням дотичних напруг на поверхні волокно-бетон. Тому при випробуваннях волокна не можуть бути розірвані, вони будуть тільки висмикуватися з матриці. Так як волокна гідрофобні, вони не мають зчеплення з матрицею, їх внесок у роботу матеріалу при навантаженнях ґрунтуватиметься лише на подоланні дотичних напруг на поверхні розділу волокно-матриця. Очевидно, що при збільшенні ширини розкриття тріщини кількість волокон, що вступають у роботу, підвищується. Вочевидь, що у подолання сил тертя лежить на поверхні розділу, все збільшується кількості волокон, необхідна додаткова робота. Цій додатковій

роботі відповідає підйом на графіках. Зі збільшенням ширини розкриття тріщини волокна, які включилися в роботу на самому початку вже набувають інерції, деякі з них висмикуються, а деякі деформуються, зменшуючись у діаметрі, і, внаслідок роботи системи на подолання сил висмикування знижується, про що свідчить спад графіків.

Для порівняння було випробувано за цією ж методикою плита бетону без армування. Слід зазначити, що з досягненні навантаження близько 13 кН плита миттєво розділилася дві частини. Визначити якісь параметри за цією методикою виявилось можливим.

Результати обчислень коефіцієнта інтенсивності напруги КІН для різних складів композицій наведені в таблиці.

Таблиця 5.13

Результати дослідження тріщиностійкості фіброармованих бетонів

| Склади | Значення КІН визначених: $\text{кН/м}^{3/2}$ | | |
|---------------|--|------------------|------------------|
| | За рівнянням (1) | За рівнянням (4) | За рівнянням (5) |
| 4-14 | 3011 | 2751 | 2082 |
| 4-22 | 3251 | 3022 | 2273 |
| 4-30 | 3317 | 3198 | 2570 |
| Бетон-матриця | - | - | 1996 |

Примітка: Перша цифра в позначках складів – об'ємна концентрація волокна, друга – довжина волокна.

Аналіз даних таблиці свідчать про те, що введенням волокон до складу дрібнозернистого бетону вдається отримати композиції, у яких коефіцієнт інтенсивності напруги більше ніж матриці на 4-30%.

Зі збільшенням довжини тріщини кількість волокон, які стягують краї тріщини підвищується. На подолання напружень тертя на поверхні розподілу витрачається додаткове навантаження. На рисунку 5.23 наведено залежність ширини розкриття тріщини від прикладеного навантаження. Наведеним кривим властива певна закономірність – початкова пряма ділянка, яка свідчить про миттєве вивільнення пружної енергії. Круте підняття кривих після

горизонтальної ділянки являється показником кількості навантаження, необхідного для дисипативних втрат енергії.

Аналізуючи результати випробування плити з неармованого дрібнозернистого бетону, можна зазначити, що момент початку збільшення тріщини та її росту в цій плиті досліджувати по прийнятій методиці виявилось неможливо. При напруженнях приблизно 0,5- 0,6МПа миттєво розділились на дві половини, що свідчить про більшу швидкість руху тріщини в матеріалі. Коефіцієнт інтенсивності напружень для неармованої матриці становить 1993[58].

Таким чином, проведені дослідження показали, що з введенням сталевих волокон можна отримати фібробетон, тріщиностійкість якого в 3,3 рази вища ніж у неармованого бетону.

5.7 Висновки з розділу

Отже, аналізуючи результати досліджень наведені в даному розділі робимо наступні висновки:

- оптимальна довжина волокна для визначення міцності при стиску та густини ФБ становить 35 мм, а для визначення міцності при згині – 50 мм;
- дисперсне армування при об'ємному вмісті волокон в 1% має значно менший вплив на фізико-механічні властивості ФБ, порівняно з 2% та 3%;
- оптимальний вміст добавки становить 1% за об'ємом;

Для кожної серії експериментів отримані наступні рівняння регресії визначення:

- міцності при стиску

$$y = -213,529 + 14,233x_1 - 0,21x_1^2 + 199,887x_2 - 41,66x_2^2 + 44,328x_3 + 2,562x_3^2 - 11,135x_1x_2 + 2,467x_1x_2^2 + 0,158x_1^2x_2 - 0,035x_1^2x_2^2 - 1,649x_1x_3 + 0,027x_1^2x_3 - 10,406x_2x_3$$

- середньої густини ФБ

$$y = -0,0224 + 0,141x_1 - 0,002x_1^2 + 2,0306x_2 - 0,4172x_2^2 + 0,2556x_3 + 0,0312x_3^2 - 0,1197x_1x_2 + 0,0258x_1x_2^2 +$$

$$+0,0017x_1^2x_2 - 0,0004x_1^2x_2^2 - 0,0108x_1x_3 - 0,0002x_1^2x_3 - 0,05x_2x_3$$

- міцності при згині

$$y = -25,1410 + 1,4636x_1 - 0,0217x_1^2 + 13,0814x_2 - 1,8263x_2^2 + 18,7510x_3 - 6,2888x_3^2 - 0,5847x_1x_2 + 0,0626x_1x_2^2 + \\ + 0,0082x_1^2x_2 - 0,0007x_1^2x_2^2 - 0,4369x_1x_3 + 0,0077x_1^2x_3 - 0,1129x_2x_3$$

Застосування фібри в бетоні сприяє підвищенню тріщиностійкості в 3 – 4 рази.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

6.1 Загальні положення

Під час зведення будівельних об'єктів повинні бути вжиті заходи для запобігання впливу на працівників та населення, яке перебуває на прилеглий до будівельного об'єкта території, небезпечних і шкідливих виробничих факторів. За можливості впливу таких факторів необхідно розробити та реалізувати заходи відповідно до ДБН А.3.2-2-2009, інших нормативних документів, нормативно-правових актів.

Вимоги до заходів із забезпечення безпеки праці необхідно зазначити у проектно-технологічній документації - проектах організації будівництва - ПОБ, проектах виконання робіт - ПВР. Виконання будівельно-монтажних робіт без ПВР забороняється.

Організація і виконання будівельно-монтажних робіт повинні відповідати вимогам:

- законодавства України про охорону праці;
- природоохоронного законодавства;
- нормативно-правових актів, що містять вимоги з охорони праці;
- державних стандартів системи стандартів безпеки праці (ССБП);
- державних будівельних норм (ДБН);
- правил безпечного зведення та безпечної експлуатації будинків і споруд;
- галузевих правил і типових інструкцій з охорони праці, що затверджені у визначеному порядку;
- гігієнічних нормативів, санітарних правил і норм, затверджених Міністерством охорони здоров'я України.

Організація виконання робіт з приготування цементобетонних сумішей повинна відповідати вимогам ДБН А.3.2-2-2009 та ГОСТ 12.3.002[55].

Під час приготування, подавання, укладання і догляду за бетоном, заготовлення, монтажу арматури, а також монтажу та демонтажу опалубки

повинні бути вжиті заходи із запобігання впливу на працюючих таких небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

- розташування робочих місць поблизу перепаду по висоті до 1,3 м і більше;
- машини, що рухаються, та предмети, що ними переміщуються;
- обвалення елементів будівельних конструкцій і опалубки;
- підвищена температура арматури (під час виконання робіт із попереднього термонапруження арматури);
- шум і вібрація, недостатня освітленість робочого місця;
- несприятливі метеорологічні умови;
- підвищена напруга в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини.

Цемент для виконання бетонних робіт необхідно зберігати в силосах, бункерах, ларях, інших закритих ємностях, запобігаючи розпиленню під час завантаження і вивантаження. Завантажувальні отвори повинні бути закриті захисними ґратами, а ґрати закриті на замок.

Цементобетонні суміші повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-96.

Обладнання, яке застосовується для виготовлення цементобетонних сумішей, повинно відповідати вимогам.

При виконанні робіт з приготування цементобетонних сумішей можливий вплив таких небезпечних та шкідливих виробничих факторів:

- машини та механізми, що рухаються, рухливі частини виробничого обладнання (дозатори, бетонозмішувачі, гідроприводи, насоси);
- підвищена запиленість повітря при вантажно-розвантажувальних та транспортних роботах;
- підвищений рівень шуму та вібрації на робочому місці;
- підвищена напруга в електричній мережі, замикання якої може пройти через тіло людини;
- токсичність вихідних матеріалів та хімічних добавок;

- недостатнє освітлення робочої зони.

Гранично допустима концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони, які утворюються в процесі виробництва цементобетонних сумішей, не повинна перевищувати норм, передбачених ДБН. Вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК), що використовуються при проектуванні виробничих будівель, технологічних процесів, обладнання, вентиляції та, для контролю за якістю виробничого середовища та профілактики несприятливого впливу на здоров'я працюючих.

Вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони підлягає систематичному контролю для попередження можливості перевищення гранично допустимих концентрацій - максимально разових робочої зони (ПДК_{мр. рз}) і середньозмінних робочої зони (ПДК_{сс.рз}).

При одночасному вмісті в повітрі робочої зони декількох шкідливих речовин різноспрямованої дії залишаються такими ж, як і при ізольованому впливі.

При одночасному вмісті в повітрі робочої зони декількох шкідливих речовин односпрямованої дії (за висновком органів державного санітарного нагляду) відношення фактичних концентрацій кожної з них (K_1, K_2, \dots, K_n) у повітрі до їх ГДК ($ГДК_1, ГДК_2 \dots ГДК_n$) не повинна перевищувати одиниці:

$$\frac{K_1}{ПДК_1} + \frac{K_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{K_n}{ПДК_n} \leq 1 \quad (6.1)$$

При виконанні вантажно-розвантажувальних робіт на виробничих базах та цементобетонних заводах слід дотримуватись вимог ГОСТ 12.3.009 і ГОСТ 12.3.020.

Пожежна безпека на робочих місцях та ділянках повинна забезпечуватись виконанням вимог ДБН.

Допустимі рівні звукового тиску в октавних смугах частот, еквівалентні рівні звуку на постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємств повинні прийматися згідно з ДСН 3.3.6.037-99[53].

Параметри постійного шуму на робочих місцях, що нормуються, є рівнями звукових тисків у октавних смугах з середньгеометричними частотами 31,5; 63; 125; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц в децибелах, які визначаються за формулою:

$$L = 20 \lg P/P_0, \quad (6.2)$$

де: P - середньоквадратичне значення звукового тиску у кожній октавній смузі, Па;

P_0 - вихідне значення звукового тиску у повітрі, що дорівнює $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Вібраційні навантаження, що виникають на робочих місцях, повинні відповідати вимогам ДСТУ 12.1.012 і ДСН 3.3.6.039. Допустимі параметри (віброшвидкості, віброприскорення, вібраційне навантаження) виробничої вібрації (загальної, локальної), що нормуються, приймаються відповідно до ДСТУ 12.1.012[53].

Обмеження часу впливу вібрації повинно здійснюватися шляхом встановлення для осіб вібронезбезпечних професій змінного режиму праці, реалізованого в технологічному процесі. Режим праці повинен встановлюватися при показнику перевищення вібраційного навантаження на оператора не менше 1 дБ (в 1,12 рази), але не більше 12 дБ (в 4 рази). При показнику перевищення більше 12 дБ (у 4 рази) забороняється проводити роботи і застосовувати машини, що генерують таку вібрацію.

6.2 Вимоги до технологічних процесів

Вимоги до технологічного процесу повинні бути викладені в проектно-технологічній документації (проекти виконання робіт, технологічний процес).

Технологічні процеси з приготування цементобетонних сумішей мають виконуватись відповідно до правил технічної експлуатації обладнання, що використовується, машин та механізмів, з дотриманням вимог, що забезпечують захист працюючих від впливу небезпечних та шкідливих факторів.

Розміщення обладнання повинно забезпечувати безпеку та зручність його обслуговування та можливість евакуації працюючих. Обладнання, яке створює підвищений рівень шуму, необхідно розташовувати в окремих приміщеннях або поміщати в звукоізолюючі кожухи. Робочі місця операторів (у шумних приміщеннях) повинні бути розташовані у звукоізолюючих кабінах. Пульти управління повинні розміщуватись у приміщенні, зручному та безпечному для спостереження за обладнанням технологічного процесу.

Робочі місця повинні відповідати вимогам ДСТУ 12.2.061, бути забезпечені засобами для прибирання, а також аптечками з необхідним складом медикаментів та нейтралізуючих речовин. У небезпечних зонах, а також на обладнанні повинні бути встановлені знаки безпеки згідно з , ДСТУ ISO 6309.

Безпека процесу приготування цементобетонних сумішей має забезпечуватися:

- автоматизацією та механізацією технологічних операцій;
- герметизацією обладнання;
- веденням процесів відповідно до технологічного регламенту;
- використанням, при можливості, нешкідливих речовин.

Процеси приготування цементобетонних сумішей повинні бути організовані таким чином, щоб виключити забруднення навколишнього середовища (повітря, ґрунту та водойм) шкідливими речовинами та відходами від виробництва. Такі відходи повинні бути знешкоджені відповідними засобами.

До обслуговування обладнання, яке застосовується для приготування цементобетонних сумішей, допускаються професійно підготовлені робітники не молодше 18 років, які мають кваліфікаційне посвідчення на право управління відповідним обладнанням[54].

6.3 Вимоги до вихідних матеріалів

Вихідна сировина та хімічні добавки, що використовуються для виробництва цементобетонних сумішей, повинні відповідати вимогам чинної нормативної документації.

Хімічні добавки, які надходять на підприємство, повинні супроводжуватись документом, що засвідчує їх якість, містить перелік складових компонентів з наведенням відсоткового вмісту небезпечних речовин та легких частинок. Кам'яні матеріали і пісок зберігають на відкритих майданах, цемент - у бункерних або силосного типу складах.

Для приготування хімічних добавок передбачаються спеціальні приміщення (відділення) на території виробничої бази чи заводу. При роботі з хімічними добавками слід дотримуватись вимогДБН. За ступенем впливу на організм шкідливі речовини підрозділяються на чотири класи небезпеки:

- 1-й - речовини надзвичайно небезпечні;
- 2-й - речовини високонебезпечні;
- 3-й - речовини помірно небезпечні;
- 4-й - речовини малонебезпечні.

Клас небезпеки шкідливих речовин встановлюють залежно від норм і показників, наведених у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Залежність класу небезпеки від норм та показників

| Найменування показника | Норма для класу небезпеки | | | |
|--|---------------------------|----------|------------|--------------|
| | 1-го | 2-го | 3-го | 4-го |
| Гранично допустима концентрація (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони, мг / куб.м | менше 0,1 | 0,1-1,0 | 1,1-10,0 | Більше 10,0 |
| Середня смертельна доза при введенні в шлунок, мг / кг | Менше 15 | 15-150 | 151-5000 | Більше 5000 |
| Середня смертельна доза при нанесенні на шкіру, мг / кг | Менше 100 | 100-500 | 501-2500 | Більше 2500 |
| Середня смертельна концентрація в повітрі, мг / куб.м | Менше 500 | 500-5000 | 5001-50000 | Більше 50000 |
| Коефіцієнт можливості інгаляційного отравлення (КВИО) | Більше 300 | 300-30 | 29-3 | Менше 3 |
| Зона гострої дії | Менше 6,0 | 6,0-18,0 | 18,1-54,0 | Більше 54,0 |
| Зона хронічної дії | Більше 10 | 10,0-5,0 | 4,9-2,5 | Менше 2,5 |

Приміщення, в яких здійснюються роботи з приготування хімічних добавок, повинні бути обладнані припливно-витяжною вентиляцією.

Гранично допустима концентрація цементного пилу в повітрі робочої зони не повинна перевищувати 6 мг/м^3 .

Транспортування цементу зі складу слід проводити з повною герметизацією всієї траси. Подання розчинів хімічних добавок з дозатора в змішувальні машини має здійснюватись автоматично.

Дозувальна апаратура повинна бути надійно герметизована. Подання матеріалів, що виділяють пил, у дозувальні машини повинно проводитися рівномірно. Змішування компонентів хімічних добавок має відбуватися в дозаторі з водою безпосередньо перед поданням їх до змішувальних машин.

У місцях приготування водних розчинів хімічних добавок повинні бути вивішені інструкції з безпеки праці та надання першої невідкладної допомоги потерпілим.

Бункерні та силосного типу склади повинні мати в перекриттях люки з міцними кришками, що зачиняються на замок. Спуск працюючих у бункери та силосні склади висотою більше 3 м допускається лише у підвісних підйомних колісках із застосуванням страхувального тросу та наявності осіб, що страхують працюючих.

6.4 Вимоги охорони праці при роботі з бетонозмішувачем

6.4.1 Загальні положення

До роботи на бетонозмішувачі допускаються робітники, які досягли 18-річного віку та пройшли попередній медичний огляд, спеціальне навчання і мають посвідчення на право керування розчино-бетонозмішувачами і не нижче першої кваліфікаційної групи з електробезпеки, а також пройшли вступний інструктаж з охорони праці, пожежної безпеки і інструктаж на робочому місці.

Моторист бетонозмішувача зобов'язаний:

- виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку і вказівки майстра (виконроба);
- користуватися виданим спецодягом, спецвзуттям та запобіжними пристосуваннями, а знаходячись на будівельному майданчику, - захисною каскою;
- пам'ятати про особисту відповідальність за дотримання правил охорони праці та безпеку товаришів по роботі;
- виконувати тільки ту роботу, по якій проінструктований і допущений майстром (виконробом);
- не виконувати розпоряджень, якщо вони суперечать правилам охорони праці;
- не допускати присутності на робочому місці сторонніх осіб;
- надавати першу медичну допомогу потерпілому від нещасних випадків на виробництві, вжити заходів щодо усунення порушень правил охорони праці.

Робочі місця повинні бути забезпечені випробуваними інвентарними огорожами, захисними і запобіжними пристроями і пристосуваннями (столиками), виготовленими за типовими проектами і встановленими згідно з планом виконання робіт.

Забороняється проводити роботи в неосвітлених або затемнених місцях. Робоче місце має бути зверху захищене козирком або настилом і мати звукову або світлову сигналізацію.

На моториста бетонозмішувача можуть діяти небезпечні та шкідливі виробничі фактори: ураження електричним струмом, обертові частини механізмів, падіння предметів, підвищена запиленість робочої зони, підвищений рівень шуму на робочому місці та інші.

Моторист бетонозмішувача отримує індивідуальні запобіжні пристосування, користуватися якими дозволяється тільки після проходження спеціального інструктажу:

- респіратор ШБ-1, «Пелюсток»;

- захисні окуляри «Моноблок-2»;
- діелектричні і гумові рукавички;
- протишумові навушники.

Моторист бетонозмішувача повинен знати:

- пристрій механізмів і вузлів, встановлених на робочих місцях;
- правила технічної експлуатації кожного виду механізмів, що обслуговуються або машин;
- найпростіші заходи по усуненню несправностей і дефектів обладнання і безпечні способи їх налагодження або ремонту;
- безпечні способи виконання допоміжних робіт - чистка машин, прибирання робочого місця і т. п.;
- безпечні методи роботи в бункерах.

6.4.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед початком роботи моторист бетонозмішувача зобов'язаний:

- ознайомитися з записами моториста попередньої зміни в журналі прийому-здачі змін;
- оглянути робоче місце, прибрати непотрібні предмети і матеріали, звільнити проходи;
- перевірити справність всіх вузлів механізму, оглянути внутрішню поверхню барабана переконатися у справності лопатей, відсутності в барабані сторонніх предметів.

Перед пуском змішувальної установки необхідно заздалегідь перевірити наявність огорожень на її обертових частинах, передачах, перевірити наявність заземлення.

При виявленні несправності повідомити майстра (виконроба) і викликати чергового слюсаря.

До завантаження барабана заповнювачами призвести пробний пуск механізму вхолосту, при цьому перевірити:

- правильність напрямку обертання;
- безперешкодне перекидання барабана і безперешкодне повернення в попереднє положення;

- надійність стопорного пристрою;
- щільність і надійність болтових з'єднань;
- стан всіх захисних огорожень;
- чи немає сторонніх шумів в роботі механізму.

Пробний пуск механізму приводити тільки за допомогою кнопок управління на щиті змішувального відділення.

Бетонозмішувач слід включати після повного завантаження матеріалами.

6.4.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи

Під час роботи бетонозмішувача моторист зобов'язаний слідкувати, щоб завантаження проводилася при поверненні барабана у вихідне положення і установці його на стопор, а вивантаження при негайному спрацюванні стопора, щоб не перегрівалися редуктори, електродвигуни, підшипники, котки, ролики, не було заклинювання барабана, шарнірів, котків.

Очищення приймачів для завантажувальних ковшів змішувальних машин допускається тільки після надійного закріплення ковша в піднятому положенні. Перебування робочих під піднятим і незакріпленим ківшем не допускається. Працюючий бетонозмішувач не залишати без нагляду.

При несправності в механізмі негайно його зупинити і не приступати до роботи до повного усунення несправностей черговим слюсарем.

Мотористові бетонозмішувача забороняється:

- проводити різного роду ремонт і обслуговування механізму на ходу;
- очищати бункер або барабан на ходу;
- знімати захисні огороження;
- відлучатися з робочого місця до повної зупинки і відключення механізму;

- завантажувати барабан матеріалами при знятій сітці.

6.4.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

Після закінчення робіт бетонозмішувач необхідно відключити від електромережі і замкнути пусковий рубильник на замок.

Щоб уникнути випадкового включення необхідно перед очищенням вилучити з ланцюга управління установки вилку розриву, а на пускач вивісити попереджувальний напис: «Не включати - працюють люди».

Бетонозмішувач необхідно очистити від застиглого розчину або бетону. Очищення барабана слід виконувати під безпосереднім наглядом майстра або виконроба.

При виробництві робіт з очищення всередині змішувального барабана необхідно:

- поставити переносне освітлення зі справною ізоляцією проводів і напругою в мережі не більше 12 В, причому електрична лампочка повинна бути захищена металевією сіткою;

- надягти черговий водонепроникний спецодяг і гумові чоботи, захисні окуляри та рукавиці.

Протерти і змазати частини механізмів, що стираються. Привести в порядок робоче місце, видалити будівельне сміття і сторонні предмети з проходів. Очистити від пилу і забруднень спецодяг та спецвзуття. Про всі неполадки під час роботи повідомити майстра (виконроба).

РОЗДІЛ 7

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. За допомогою використання методів математичного планування встановлено залежність фізико-механічних властивостей сталевібробетону від змінних факторів (довжини, вмісту волокна та вмісту пластифікуючої добавки).
2. Оптимізований склад сталевібробетону за об'ємним вмістом та довжиною волокна.
3. Розроблена методика випробування і визначена тріщиностійкість сталевібробетону.
4. Розроблена технологія приготування суміші, яка складається з наступних етапів:
 - дозування води та добавки;
 - приготування сухої суміші: цемент-заповнювач;
 - поступове додавання сталевого волокна до сухої суміші, таким чином щоб не утворювались комкування;
 - поступове додавання води з добавкою, при постійному перемішуванні протягом 3 хв.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сунак О.П. Сталефібробетонні конструкції: Навч. посібн. - Луцьк: Media, 1999. - 158с.
2. Мещерін В.М. Попередження тріщиноутворення в бетоні за допомогою фіброармування // Бетон та залізобетон.-2012.- № 1.-С. 50.
3. Барашіков О.Я., Бірюкович Ю.Л., Афанасьєва Л.В., Клібаутський О.М. Скловолкнисті матеріали для армування залізобетонних конструкцій// Будівельні матеріали та конструкції.- 1980.- № 1.-С. 14 – 15.
4. Холмянський М.М., Курілін В.В., Еднерал А.Ф. Сталефібробетон з аморфною фіброю // Бетон і залізобетон. - 1991. - № 6. - С. 9 - 10.
5. Каган М.З. Оцінка розташування сталевих волокон // Бетон та залізобетон. - 1990. - № 5. - С. 18.
6. Рабінович Ф.М. Про оптимальне армування сталевібробетонних конструкцій // Бетон та залізобетон. - 1986. - № 3. - С. 17 - 19.
7. Hannant D.J Steel fibre reinforced concrete. // Prospects for fibre reinforced construction materials. Proceeding of international building. Exhibition Conference, Now, 1971. – P. 47-55.
8. Бердичевський Г.І., Светов А.А., Курбатов Л.Г. Сталефібробетонні переднапружені ребристі плити розмірами 6х3 м для покриттів // Бетон та залізобетон. -1984. - №4. - с. 33-34.
9. Курбатов Л.Г., Вилегжанін В.П. Використання бетону, армованого відрізками дроту, в тонкостінних оболонках // Бетон і залізобетон. -1973. - №5. - 3 8-11.
10. Рабінович Ф.М. Застосування сталевібробетону в конструкціях інженерних споруд // Бетон та залізобетон. - 1984. - № 12. - С. 22 - 25.
11. Дедюхов А.А. Міцність фібробетону, армованого різними волокнами // Бетон і залізобетон. - 1989. - № 8. - С. 13 - 14.
12. Сакварелідзе О.В. Міцні та деформаційні властивості сталевібробетону // Бетон та залізобетон. – 1985. – №11. - з 12-13.
13. Bilosir W., Haidukow., Bolcskey E., Krapfenbauer R. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegelemente mit Fasern aus Blechabfällen / Zl. AD/1106-7/1994/- Wien, 1994.- 64 s.
14. Судаков В.В., Курбатов Л.Г., Стернін Х.Х., Хегай О.М. Контроль вмісту фібр у сталевібробетонних конструкціях // Бетон і залізобетон. - 1986. - № 2. - С. 26 - 27.
15. Гетун Г.В. Експериментально-теоретичні дослідження згинальних залізобетонних конструкцій, посилені у розтягнутій зоні шаром сталевібробетону: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01.-Київ, 1983. – 180с.
16. Куликов О.М. Експериментально-теоретичні дослідження властивостей фібробетону при безградієнтному напруженому стані: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01. - Л., 1974. - 121с.
17. Соломін В.І. Вплив зчеплення фібр з матрицею на міцність та деформативність сталевібробетонних конструкцій: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01.-Київ, 1979. – 140с.
18. Сопільняк О.В. Напружено-деформований стан згинальних залізобетонних комбінованих армованих елементів при короткочасній та тривалій дії навантаження: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01.-Київ, 1983. – 150с.

19. Сунак О.П. Міцність, тріщиностійкість та деформативність нормальних перерізів згинальних комбіновано армованих сталевібробетонних елементів: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01.-Київ, 1986. – 175с.
20. Ключев С.В., Лісовик Р.В. Фібробетон на композиційних в'язучих і техногенних пісках Курської магнітної аномалії для конструкцій, що згинаються // Інженерно-будівельний журнал. - 2012. - № 3. - С. 41 - 47.
21. Сімакіна Г.М. Високоміцний дисперсно-армований бетон: Дис. канд. техн. наук: 05.23.05. - П., 2006. - 161с.
22. Соловйов В.Г. Вплив дисперсного армування та міцнісні властивості сталевібробетонів, що піддаються тепловологості обробці: Дис. канд. техн. наук: 05.23.05.- Л., 2006. - 165с.
23. Сунак О.П. Міцність, тріщиностійкість та деформативність нормальних перерізів згинальних комбіновано армованих сталевібробетонних елементів: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01.-Київ, 1986. – 175с.
24. Трамбовецький Б.П. Бетон, армований дисперсною арматурою // Бетон та залізобетон. -1974. - №2. - З 40-42.
25. Черноусов Р.М. Сталевіброшлакобетонні кільцеві елементи// Бетон і залізобетон. - 2010. - №5. - З 6-12.
26. Ставров Г.М., Ніколаско С.Д. Експериментальне дослідження роботи фібробетонних та фіброзалізобетонних конструкцій при знакозмінному малоцикловому навантаженні // Вісті вузів. Серія «Будівництво та архітектура». - 1986. - №1. -. З. 18-22.
27. Аболіньш Д.С., Трейс Ю.Е. Експериментальне дослідження залізобетонних елементів, що згинаються, в яких звичайний бетон замінений голковобетоном // Розрахунок і оптимізація будівельних конструкцій. - Рига: РПІ, 1973. Вип.1. - с. 46-50
28. Сопільняк О.В. Напружено-деформований стан згинальних залізобетонних комбінованих армованих елементів при короткочасній та тривалій дії навантаження: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01.-Київ, 1983. – 150с.
29. Ставров Г.М., Ніколаско С.Д. Експериментальне дослідження роботи фібробетонних та фіброзалізобетонних конструкцій при знакозмінному малоцикловому навантаженні // Вісті вузів. Серія «Будівництво та архітектура». - 1986. - №1. -. З. 18-22.
30. Степанова Г.Г. Дослідження сталевібробетону при градієнтному напруженому стані: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01. - Л., 1975. - 168с.
31. Курбатов Л.Г., Вилегжанін В.П. Використання бетону, армованого відрізками дроту, в тонкостінних оболонках // Бетон та залізобетон. -1973. - №5. - З 8-11.
32. Ейзеншмідт Р.О. Деформативність згинальних сталевібробетонних балок, що мають фіброве та комбіноване армування при тривалій дії навантаження: Дис... канд.техн.наук: 05.23.01. – Рига, РПІ, 1983. – 168с.
33. Струговець І.Б., Івлєв М.А., Недосєко І.В. // Вісті КДАСУ. - 2012. - № 4. - С. 117 - 123.
34. Талантова К.В., Міхеєв Н.М. Розробка конструкції сталевібробетонного контейнера для розміщення та поховання токсичних промислових відходів // Бетон та залізобетон. – 2009. – №3. - з 13-15.
35. <http://tkv.users.altstu.ru/SFB/1-2.html>
36. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
37. ДСТУ Б В. 2.7-112-2002. Цементи. Загальні технічні умови.

38. ДСТУ Б В. 2.7-187-2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск.
39. ДСТУ Б.В.2.7-32-95. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови.
40. ДСТУ 9179:2022. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань.
41. ДБН А.3.2-2-2009. Охорона праці і промислова безпека в будівництві. Основні положення.
42. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
43. ДСТУ Б А.3.2-3:2009. Роботи з приготування цементобетонних виробів.