МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Кваліфікаційна робота/проект

_____другий магістерський рівень_____
(рівень вищої освіти)

на тему: Дослідження властивостей фібробетонів з використанням фібри різного виду_____

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1922-пцб-дн
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми промислове і цивільне будівництво
(код і назва освітньої програми)
_____Піхотенко Олексій Сергійович_____
(прізвище та ініціали)

Керівник _____директор ТОВ «АНСТРОЙ»_____
(стейкхолдер), доктор філософії, Шуваєв А.А._____
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Рецензент _____
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Запоріжжя
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра Промислового та цивільного будівництва
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(шифр і назва)
Освітня програма «Промислове і цивільне будівництво»
(шифр і назва)
Спеціалізація -
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
завідувач кафедри *промислового та цивільного будівництва*
проф. І.А. Арутюнян
"02" 09 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ / ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Піхотенко Олексій Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи (проекту) Дослідження властивостей фібробетонів з використанням фібри різного виду
керівник роботи Шуваєв А.А., директор ТОВ «АНСТРОЙ» (стейкхолдер), доктор філософії,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "30" 09 2024 року № *1486-с*
2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи *грудень 2024р.*
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи добавки для бетонів, фібра, бетон важкий
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, розділ 1 – Теоретичні аспекти виробництва фібробетонів та їх застосування в будівельній індустрії, розділ 2 – Характеристика застосовуваних матеріалів для дослідження фібробетонів, розділ 3 – Дослідження основних закономірностей та процесів освіти структури фібробетону з використанням фібри різного виду. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 8 листів

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Шуваєв А.А., директор ТОВ «АНСТРОЙ» (стейкхолдер), доктор філософії		
Розділ 2	Шуваєв А.А., директор ТОВ «АНСТРОЙ» (стейкхолдер), доктор філософії		
Розділ 3	Шуваєв А.А., директор ТОВ «АНСТРОЙ» (стейкхолдер), доктор філософії		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Розділ 1	1.09.2024 - 1.10.2024	
2	Розділ 2	2.10.2024 – 15.11.2024	
3	Розділ 3	16.11.2024 – 25.12.2024	

Студент _____ Піхотенко О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ Шуваєв А.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Данкевич Н.О.
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Піхотенко Олексій Сергійович. Дослідження властивостей фібробетонів з використанням фібри різного виду.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник А.А. Шуваєв. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2024.

Широке використання бетону як будівельного матеріалу обумовлена, перш за все, його високою міцністю на стиск, а також довговічністю та зручністю в обробці, завдяки якому бетонну суміш можна залити в опалубку та отримати виріб будь-якої форми. Суміші на основі цементу також використовуються для ремонту, оздоблювальних робіт, цегляної кладки.

Сучасні добавки необхідні вирішувати різні проблеми. Одні з них дозволяють підвищити зручність укладки, інші забезпечують можливість працювати при низьких температурах, збільшувати швидкість застигання бетону або підвищувати його водовідштовхувальні характеристики.

Також існують добавки, призначення яких - нівелювати ті недоліки, які властиві бетону природним чином.

Вибір конкретних добавок та їх поєднань проводиться виходячи з призначення бетонного розчину, умов, у яких виконуються бетонні роботи, умов експлуатації готової конструкції.

В даний час значними темпами зростає потреба в застосуванні легких теплоізоляційних матеріалів огороджувальних конструкцій, що володіють високими характеристиками міцності. Це пов'язано зі збільшенням останніх років зростання цін на енергоресурси. У ролі армуючих бетонну матрицю компонентів виступають полімерні або базальтові фіброві волокна, сприяючи тривимірному підвищенню міцності, перешкоджаючи утворенню мікротріщин.

Бетони, армовані полімерними та базальтовими волокнами, мають високі значення фізико-механічних характеристик. Такий вид зміцнення дозволяє компенсувати основні недоліки звичайного бетону - низькі характеристики міцності при розтягуванні, а також крихкість руйнування (тріщиностійкість).

Ключові слова: теплоізоляція, тепловий захист, технологія утеплення, довговічність теплоізоляції, дефекти.

ABSTRACT

Pihotenko Oleksiy Serhiyovych. Investigation of the Properties of Concrete Using Different Types of Fiber.

Qualifying thesis for obtaining a master's degree of higher education in the specialty 192 Construction and civil engineering, academic supervisor A.A. Shuvaev. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebny Zaporizhia National University, Department of Industrial and Civil Engineering, 2024.

The wide use of concrete as a building material is due, first of all, to its high compressive strength, as well as durability and convenience in processing, thanks to which the concrete mixture can be poured into the formwork and a product of any shape can be obtained. Cement-based mixtures are also used for repairs, finishing works, brickwork.

Modern supplements are necessary to solve various problems. Some of them make it possible to increase the convenience of laying, others provide the ability to work at low temperatures, increase the speed of concrete solidification or increase its water-repellent characteristics.

There are also additives, the purpose of which is to level those defects that are characteristic of concrete in a natural way.

The choice of specific additives and their combinations is based on the purpose of the concrete solution, the conditions under which concrete works are performed, and the operating conditions of the finished structure.

Currently, the need for the use of light heat-insulating materials for fencing structures with high strength characteristics is growing at a significant rate. This is due to the increase in energy prices in recent years. In the role of reinforcing the concrete matrix of components, polymer or basalt fiber fibers act, contributing to a three-dimensional increase in strength, preventing the formation of microcracks.

Concretes reinforced with polymer and basalt fibers have high values of

physical and mechanical characteristics. This type of strengthening makes it possible to compensate for the main disadvantages of ordinary concrete - low tensile strength characteristics, as well as fragility of destruction (crack resistance).

Key words: thermal insulation, thermal protection, insulation technology, durability of thermal insulation, defects.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	7
1	ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ФІБРОБЕТОНІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В БУДІВЕЛЬНОЇ ІНДУСТРІЇ.....	10
1.1	Проблеми, стан питання та перспектива у сфері розвитку виробництва фібробетонів.....	10
1.2	Види, характеристика фібробетонів та армуючих волокон для їх виробництва.....	13
1.3	Оцінка можливості застосування відходів виробництва як армуючого волокна для виготовлення фібробетонів…….	22
2	ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАСТОСОВУВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІБРОБЕТОНІВ……..	28
2.1	Властивості та характеристики застосовуваних для виробництва фібробетонів матеріалів.....	28
2.2	Застосовуване обладнання в ході дослідження.....	39
2.3	Технологія виготовлення зразків.....	40
2.4	Методи випробувань вихідних матеріалів та фібробетонів.....	40
3	ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА ПРОЦЕСІВ ОСВІТИ СТРУКТУРИ ФІБРОБЕТОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІБРИ РІЗНОГО ВИДУ……...	41
3.1	Дослідження властивостей бетону з металевими армуючими волокнами.....	42
3.2	Дослідження властивостей бетону з поліпропіленовими армуючими волокнами.....	56
3.3	Дослідження властивостей фібробетону з використанням поліамідного фіброволокна.....	68
3.4	Техніко – економічне обґрунтування використання фібробетону на основі металевої, поліпропіленової фібри та поліамідної фібри.....	73
	ВИСНОВКИ.....	78
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..	80

ВСТУП

Актуальність теми: У сучасному будівництві практично щодня відбувається впровадження нових технологій та здійснюється випуск модернізованих та ефективних будівельних матеріалів. При цьому будівельним матеріалам приділяється значна роль, і конструкціям з бетону особливо за цілим рядом факторів.

Відомо, що провідним матеріалом під час зведення будівель чи споруд, незалежно від його призначення, розмірів, форми та типу, є бетон.

На сьогоднішній день показник світового обсягу виробництва бетону складає 2 млрд. $м^3$, коли порівняно нижче показники випускаємої промислової продукції та будівельних матеріалів інших видів.

Під бетоном розуміють штучний кам'яний матеріал, отриманий шляхом формування та твердіння раціонально підібраної в'яжучої суміші, з заповнювачем дрібної та великої фракції, води та при необхідності спеціальних добавок. Формування жорсткості та можливість сприйняття навантаження від зовнішніх впливів повністю залежить від застосування заповнювача, що сприяє зменшенню усадки бетону та виникненню усадкових тріщин.

Бетон залишається основним конструкційним матеріалом у різних експлуатаційних умовах, оскільки має високий показник архітектурно-будівельної виразності, малу енергоємність та експлуатаційну надійність. Поряд із простотою та доступністю технології цього матеріалу, виникає можливість удосконалення бетону за допомогою застосування відходів промислового виробництва.

Використання відходів виробництва в ефективних будівельних матеріалах, таких як бетон, вирішує питання, пов'язане зі зниженням вартості будівництва та забезпечує нормативні показники рівня якості продукції, що виробляється.

З бетонів, які відносяться до нових видів і активно впроваджуються в

виробництво, виділяють фібробетон, склад якого може включати в себе фіброволокно різного виду. Армований бетон – це класичне поєднання дрібнозернистих бетонів з різними армуючими волокнами: сталевими, скляними або синтетичними. Цей вид бетону призначений для формування конструкцій з особливою міцністю.

У сучасному світі велика увага приділяється вивченню та удосконаленню фізико – механічних та деформативних характеристик фібробетонів.

Актуальність теми пов'язана з тим, що застосування фібри в бетоні забезпечує бетону більш високі показники за такими характеристиками як міцність на розтяг, вигин, зріз, ударну міцність, тріщиностійкість, морозостійкість, водонепроникність, жароміцність та пожежостійкість. Крім того, відмінними рисами фібробетонів є високі показники анізотропності та дискретності. При цьому такі ознаки сприяють можливості виділити фібробетони в незалежну групу конструкційних матеріалів, які відрізняються будовою та властивостями.

Мета роботи полягає у визначенні впливу різних видів фібр, в тому числі і відходів промислового виробництва, на міцнісні показники фібробетонів.

Предмет дослідження – є склади та властивості фібробетонів.

Об'єкт дослідження – фібробетони з використанням металевої, поліпропіленової фібри та фібри з відходів виробництва – поліамідного волокна.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі **завдання**:

1. Розглянути теоретичні аспекти виробництва фібробетонів та їх застосування у будівельній промисловості.

2. Проаналізувати властивості та характеристики застосовуваних матеріалів на дослідження з вибором необхідних методів випробувань.

3. Дослідити основні закономірності та процеси утворення структури фібробетону з використанням металевої, поліпропіленової фібри та фібри з

відходів виробництва – поліамідного волокна.

4. Дослідити фізико – механічні властивості у процесі твердіння фібробетонів на металевій, поліпропіленовій фібрі та фібрі з відходів виробництва – поліамідному волокні.

5. Підібрати оптимальний склад фібробетонів із використанням мікронаповнювача та гіперпластифікатора на основі полікарбоксилату.

Методи дослідження – аналіз, порівняння, спостереження, експеримент, опис.

Наукова новизна – досліджено фізико – механічні властивості дрібнозернистого фібробетону, що самоущільнюється, на металевій, поліпропіленової фібри та фібри з відходів виробництва – поліамідному волокні. Підібрано оптимальний склад фібробетонів з використанням мікронаповнювача та гіперпластифікатора на основі полікарбоксилату, що дозволяє скоротити витрату цементу при одночасному поліпшенні фізико - механічних характеристик фібробетонів на металевій, поліпропіленової фібри та фібри з відходів виробництва – поліамідному волокні. Встановлено можливість використання у дрібнозернистому фібробетоні, що самоущільнюється, у вигляді фіброволокна відходів виробництва - поліамідних волокон. Це дозволяє знизити собівартість монолітних конструкцій без зниження їх фізико-механічні характеристики.

Структура і об’єм магістерської роботи. Робота складається із введення, чотирьох розділів, висновків, загальних висновків та пропозицій, списку використаних джерел. Основною темою текст викладено на 81 сторінках, з них 20 рисунків, 15 таблиць, та містить списки літератури зі 20 найменування праць вітчизняних та зарубіжних авторів.

1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ФІБРОБЕТОНІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У БУДІВЕЛЬНІЙ ІНДУСТРІЇ

1.1 Проблеми, стан питання та перспектива в галузі розвитку виробництва фібробетонів

Більшість сучасних досліджень використовувалися та застосовувалися в різному вигляді минулими поколіннями. Так у сучасний час винахідники просто успішно доопрацювали досвід попереднього покоління із застосуванням сучасних технологій та матеріалів.

До таких винаходів можна віднести розробку нового будівельного матеріалу, такого як фібробетон, який за результатами аналізу формування та поліпшення бетонів та конструкцій є високоперспективним матеріалом XXI століття. Фібробетон з'явився в 1874 року, після експериментів англійського будівельника зі звичайним бетоном, додаючи до нього суміші різних матеріалів. Аналізуючи літературні джерела, можна стверджувати, що в 1960-х роках почалося широке дослідження у сфері виробництва фібробетону. У 1979 році вперше в Союзі було здійснено застосування фібробетону, з витратою фіброволокна 1,5% на об'єм бетонної суміші, при влаштуванні дна резервуару для технічної води [4].

Бетон за останні 300 років є найпоширенішим і найпопулярнішим будівельним матеріалом. За своїми фізичними характеристикам бетон поступається будівельним матеріалам природного походження, але перемагає у простоті застосування та вартості. Поряд з цим будівельники прагнули збільшити його характеристики міцності і в водночас скоротити витрати [7].

До нового покоління бетонів відносяться дисперсно-армовані бетони, поява яких зумовлена розвитком інноваційних технологій, що змінюють існуючі види. Фібробетон є різновид цементного дрібнозернистого бетону, з

рівномірно розподіленими фіброволокнами, що здійснюють функцію армуючих компонентів. Під фіброволокнами мають на увазі природні чи штучні волокна матеріалів [3].

У більшості країн активно розвивається науково-дослідна діяльність, у якій досліджуються властивості дисперсно-армованих бетонів. Найчастіше фібробетон застосовується при зведенні фундаментів під обладнання, що супроводжується динамічними діями, у дорожньому будівництві та при облицюванні тунелів [2].

У будівництві промислового та цивільного призначення бетони, армовані фіброю різного виду, знаходять застосування в огороджувальних елементах будівель та споруд. Виготовляють з фібробетону стіни, перегородки, перекриття, покриття, підлоги, конструкції спеціального призначення, такі як: труби, канали, лотки, шпунти, кільця та тюбінги - мають хороші експлуатаційні властивості [5, 6].

У закордонному будівництві дисперсно-армовані бетони застосовують при будівництві мостів, доріг, тунелів (зведення морських платформ), також використовують при влаштуванні підлог промислових будівель і споруд [9].

Позитивно себе зарекомендували у дорожньому будівництві плити виготовлені з фібробетону. Ці плити застосовуються як незнімна опалубка при спорудженні мостів, що дозволяє суттєво спростити та прискорити процес заливання конструкцій. Для плит мостового настилу різної товщини та різних прольотів між головними балочними фермами опорною частиною може служити опалубка, виконана з фібробетону. Опалубка має гарну сумісність з бетоном, завдяки цьому вона є складовою монолітних бетонних конструкцій. Також високий показник ступеня міцності при впливі хімічних речовин, що сприяє можливості використання цього матеріалу для спорудження гідроізоляційних покриттів, водовідвідних лотків та каналізаційних колекторів [3]. Дані щодо застосування фібробетонів у будівництві наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Застосування фібробетонів у будівництві

Найменування конструкцій, елементів та споруджень	
Монолітні	Збірні
Покриття автомобільних доріг	Залізничні шпали
Мостові настили	Балки
Фундаменти та несучий каркас будівель підвищеної поверховості	Сходи
Водовідвідні дамби	Стінові панелі
Вогнетривка штукатурка	Трубопроводи
Промислові підлоги	Покрівельні панелі та черепиця
Самонівелюючі підлоги	Вибухостійкі конструкції
Просторові покриття та споруди	Елементи просторових покрить та споруд
Захисні споруди	Палі та шпунти

Вирізняють такі переваги фібробетонів:

- фібробетон має високі експлуатаційні якості;

- зниження витрат, за рахунок використання фіброволокна замість армуючого каркасу чи сітки;

- фібробетон температуростійкий, вологостійкий та морозостійкий;

- фібробетон має гарні адгезійні якості;

- фібробетон має меншу вагу в порівнянні зі звичайним бетоном;

- термін служби вище в порівнянні зі звичайним бетоном.

До недоліків фібробетонів відносять:

- підвищений знос бетонозмішувального обладнання;

- вартість вища у порівнянні зі звичайним бетоном. Даний недолік компенсується довговічністю матеріалу. Так само використання відходів промислового виробництва поступово зменшать вартість фібробетону.

Дисперсно-армовані бетони дають економічний ефект за рахунок високих показників довговічності, експлуатаційної придатності,

зносостійкості, а також підвищення міжремонтного ресурсу та безпеки будівель та споруд при пожежах та сейсмічних впливах [16].

Активне виробництво та успішне використання фібробетону практикується більш ніж у ста країнах світу. З кожним роком цей матеріал застосовують у нових сферах будівництва. На сьогоднішній день в Україні номенклатура та показник обсягу своєї продукції виконаної з фібробетону невеликі, проте досвід зарубіжних країн переконує вітчизняних фахівців у перспективності використання даного будівельного матеріалу [13].

Зріс показник обсягу науково – технічних публікацій, присвячених дисперсному армуванню будівельних матеріалів [6]. Результати наукових досліджень повідомляють на конференціях та науково – технічних семінарах, порушуються питання щодо практичного використання фібробетонів у будівельній промисловості [7]. Також даної проблемі присвячуються міжнародні конгреси та симпозіуми [9].

1.2 Види, характеристика фібробетонів та армуючих волокон для їх виробництва

Композиції, виконані з дисперсно-армованих бетонів, є будівельними конструкціями, які мають високі показниками міцності на вигин та ударну в’язкість. Вибір дисперсно-армованих волокон обумовлюється тим, які характеристики повинна мати конструкція, щоб задовольняти заданим вимогам [3].

У сучасному будівництві бетони дисперсно армують металевими (частіше сталевими) та неметалевими (мінеральними, синтетичними та іншими) високо- та низькомодульними фіброволокнами з різною довжиною та поперечним перерізом. Сталеві волокна отримують при різанні низьковуглецевого дроту, листової сталі, фольги, також формують з розплаву

та фрезеруванням смужок та слябів. Фібра неметалічного походження (синтетична, базальтова, скляна та ін.) являє собою моноволокна у вигляді відрізків, комплексні нитки і фібрильовану плівку, при виготовленні яких, у ряді випадків, застосовують промислові відходи відповідних виробництв.

Ефективність фібробетонів досягається правильним поєднанням властивостей складових його компонентів. Важливим компонентом цих бетонів є фіброволокна - сталеві або неметалеві.

Фібробетон класифікують залежно від матеріалу фіброволокна. В даний час бетони армують фіброволокнами наступного виду:

1. Сталева фібра – відрізки сталевих волокон (Рис. 1.1).

Виготовляється наступними способами:

- різання тонкого дроту або сталевого листа;
- витяжка (екструдування) сталевого розплаву;
- фрезерування спеціальних слябів.

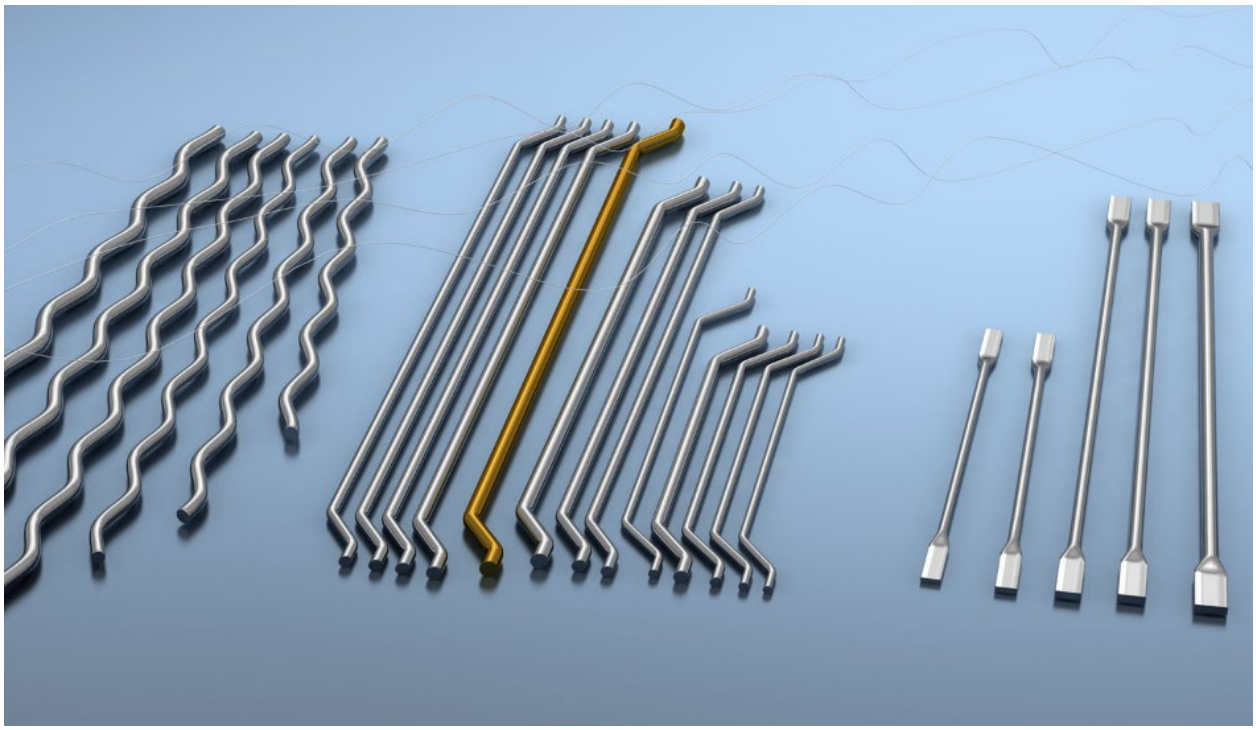

Рисунок 1.1 – Види сталевої фібри

Сталева фіброва арматура досить ефективна з урахуванням вартості. Модуль пружності такої фібри в 5 – 6 разів більший від модуля пружності бетону. Таке фіброволокно може мати круглий, прямокутний та інший

поперечний переріз розміром 0,2 – 1,6 мм та довжиною 5 – 160 мм [9].

Сталефібробетони - це поєднання дрібнозернистого та важкого бетону зі сталевою фіброю, рівномірно розподіленою за обсягом бетону, спільна робота яких забезпечується за рахунок зчеплення анкерів на кінцях фібр та їх поверхні.

Порівняно з традиційним залізобетоном сталефібробетон рекомендують для виготовлення конструкцій, використання яких найефективніше. Технічні переваги сталефібробетону по порівняно із звичайним залізобетоном [8]:

- підвищення тріщиностійкості, ударної міцності, в'язкості руйнування, зносостійкості та морозостійкості;

- зниження усадки і повзучості;

- використання більш ефективних конструктивних рішень, таких як тонкостінні конструкції, конструкції без стрижневої, сітчастої, розподільної чи поперечної арматури;

- знижується показник трудовитрат на арматурні роботи, підвищується ступінь механізації виробництва;

- застосування нових технологій формування армованих конструкцій, таких як торкретування.

2. Скляна фібра – скляна мононитка (Рис. 1.2).

При дисперсному армуванні бетону застосовують особливе лугостійке скловолокно, оскільки звичайне алюмоборосилікатне, тобто безлужне, волокно досить швидко піддається корозії в лужному середовищі при твердінні бетону, що вимагає спеціальних захисних заходів. За кордоном використовують лугостійке скловолокно марки «Цим – Філ», розробка та випуск якого здійснюється у Великій Британії. У Японії виготовляють скловолокно «Ерфайб» та «Ерфайб – супер» – підвищена стійкість до дії лугів. В Україні для армування бетону використовують фібру фірми Sika Україна, лугостійке скловолокно марки Sika® Reemat Premium [8].



Рисунок 1.2 – Скляна фібра

3. Базальтова фібра – матеріал натурального походження, являє собою короткі відрізки (Рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Листове базальтове волокно

Базальтове волокно має високу міцність від 1900 – 3900 МПа та високу ступінь дисперсності армування бетону, що тягне за собою підвищення міцності та деформативності, а також має потужну вихідну сировинну базу.

Фібробетон на основі базальтового волокна переносе великі пружні деформації, оскільки базальтове волокно практично не має пластичних деформацій при розтягуванні, модуль пружності базальтофібробетону перевищує модуль пружності звичайного бетону в 3 і більше разів. За рахунок невеликої щільності базальтового волокна, відбувається полегшення конструкцій, загальна вага будівлі та витрати на будівництво зменшуються. Товщина волокон становить 10 – 12 мкм, цьому сприяє показник поверхні зчеплення з цементною матрицею до 100000 м/кг залежно від дозування волокна [18].

4. Синтетичні поліпропіленові волокна – тонкі волокна білого або жовтого кольору, завдовжки 6 – 12 мм (Рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Синтетична пропіленова фібра

Ефективно застосовується для покращення реологічних властивостей бетонних сумішей, сприяє структуроутворенню бетонної матриці на стадії твердіння та підвищення довговічності. Фібра з таких волокон відрізняється хімічною стійкістю та не високою вартістю.

Високомодульний поліпропілен відрізняється високим модулем пружності до 800 МПа, високою механічною міцністю до 500 МПа та хімічною стійкістю, а також широкий температурний діапазон застосування від -60 °С до -320 °С, радіопрозорістю та неелектропровідністю.

Синтетична добавка сприяє отриманню додаткових властивостей:

- відсутні мікротріщини та розшарування;

- підвищується здатність опору до агресивних середовищ та стійкість до навантажень та деформацій;

- підвищується вологостійкість та довговічність;

- припиняється утворення пилу.

5. Акрилові волокна (поліакрилонітрильні волокна) – отримують з акрилонітрилу – продукт, отриманий шляхом переробки кам'яного вугілля, газу чи нафти (Рис. 1.5). При полімеризації з акрилонітрилу отримують поліакрилонітрил. З його розчину формується фіброве волокно, яке піддають витягуванню, промиванню, засмальюванню, гофруванню та сушінню.



Рисунок 1.5 – Акрилові волокна

Волокна набувають вигляду довгих ниток і штапелю. Даний вид волокон стійкий до дії сильних кислот із середнім показником концентрації навіть у процесі нагрівання та стійкий до лугів середньої концентрації.

Поперечний переріз поліакрилонітрильного фіброволокна має форму квасолі або гороху та шорстку поверхню завдяки технології мокрого прядіння [23, 24].

Також використовують як наповнювач фіброволокна наступних видів: поліетиленові волокна; нейлонові волокна; віскозні надміцні; поліефірні; бавовняні; карбонові; вуглецеві волокна, які є найбільш ефективними з позиції міцності та довговічності при екстремальному хімічному та пожежному впливах; азбестові; змішана фібра.

Поширеними видами дисперсних волокон є: металева, поліпропіленова, базальтова, скляна, вуглецева та целюлозна фібра. При виготовленні фібробетону великий вплив надає вибір волокна, тип в'яжучого та оптимально підібраний хімічний склад ниток. Основні характеристики найчастіше використовуваних видів волокон наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Основні характеристики різних видів фіброволокон

Характеристика	Вид фібри			
	Сталева	Скляна	Поліпропіленова	Базальтова
Довжина фіброволокна, мм	30...50	4,5...18	6...18	3,2...15,7
Діаметр	0,25...1,2 мм	13...15 мкм	10...25 мкм	13...17 мкм
Температура плавлення, °С	1550	860	160	1450
Стійкість до корозії та лугів	Низький показник	Тільки для лугостійкої фібри	Високий показник	Високий показник

Порівняльні механічні характеристики різного виду волокон, що застосовуються у будівництві, представлені у таблиці 1.3 [17].

Таблиця 1.3 - Фізико-механічні властивості різних видів фіброволокон, що використовуються для виготовлення дисперно-армованих бетонів

Вид фіброволокна	Показник щільності, г/см^3	Характеристики модуля пружності, МПа	Показник міцності на розтягування, МПа	Відсоток подовження при розриві, %
1Сталева фібра	7,80	190000...210000	600...3150	3,0...4,0
2 Скляна фібра	2,60	7000...8000	1800...3850	1,5...3,5
3 Базальтова фібра	2,6...2,7	7000...11000	1600…3200	1,4...3,6
4 Синтетична поліпропіленова фібра	0,9	3500...8000	400...700	10...25
5 Акрилова фібра	1,1	2100...2150	210...420	25...45
6 Поліетиленова фібра	0,95	1400...4200	600...720	10...12
7 Нейлонова фібра	1,1	4200…4500	770…840	16…20
8 Віскозна надміцна	1,2	5600…5800	660…700	14…16
9 Поліефірна фібра	1,4	8400…8600	730…780	11…13
10 Бавовняна фібра	1,5	4900…5100	420…700	3,0…10
11 Карбонова фібра	1,63	280000…380000	1200…4000	2,0…2,2
12 Вуглецева фібра	2,0	200000…250000	2000…3500	1,0…1,6
13 Асбестова фібра	2,6	68000…70000	910…3100	0,6…0,7

Геометричні параметри використовуваної фібри, її кількість в бетонній суміші, дисперсність мінеральних компонентів у матриці – все це сприяє підвищенню ступеня впливу динамічного опору. Також як ударостійкість бетону, при дисперсному армуванні, зростає незалежно від показника середньої щільності матриці та різного виду застосовуваного фіброволокна.

Характеристика об’ємного відсотка армування у межах від 1,5 – 3,0%, при дисперсному армуванні полімерними волокнами дрібнозернистих бетонів показує, що показник ефективності таких фібробетонів не менш ніж у сталефібробетонах. При збільшенні відносної довжини фіброволокна збільшується ударна стійкість. Підвищуючи концентрацію дисперсного волокна у бетонні суміші до 5 – 10 % показник модуля пружності зростає, що забезпечує високу ударостійкість фібробетону [19].

В роботах відомих дослідників описуються результати впливу різних

видів неметалевих фіброволокон на тріщиностійкість фібробетонів. На основі результатів досліджень даних вчених встановлено, що найбільш ефективним є композитне склопластикове фіброволокно, широко представлене на ринку, для виробництва бетонних конструкцій (Рис. 1.6).

Дане фіброволокно, при оптимальних дозах дозволяє отримати фібробетони з фактичним класом по залишковій міцності в межах 50% від фактичного класу за міцністю на розтяг при згинання, а застосування полімерної мікро і макрофібри - тільки 30% [17].

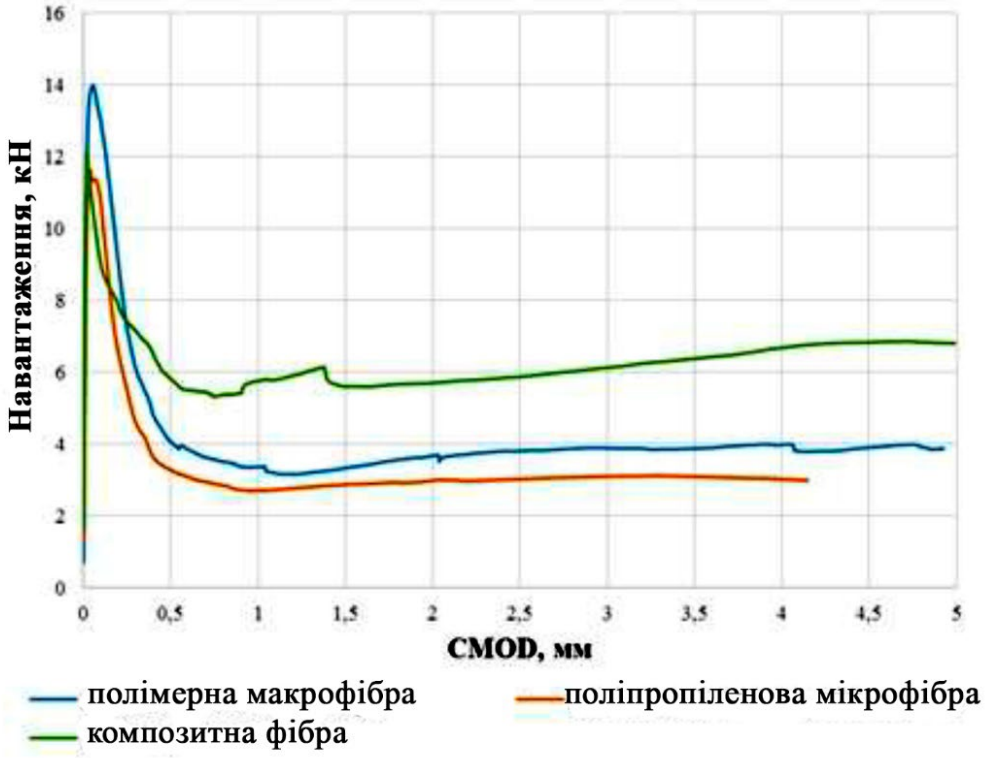

Рисунок 1.6 – Графік «навантаження–CMOD» випробувань фібробетону

Різноманітність зазначених видів фібрових волокон є достатнім для формування широкого спектру дисперсноармованих бетонів різного складу, щільності та характеристик міцності, що сприяє досить масштабній та об’єктивній оцінці впливу на фізико – механічні властивості та довговічність одержуваних фібробетонів [13].

1.3 Оцінка можливості застосування відходів виробництва у якості армуючого волокна для виготовлення фібробетонів

Деякі дослідники даної теми вважають фібробетон матеріалом типу «структура в структурі», що має складну поліструктурною організацією та виділяють у ньому два масштабні рівні:

1) мікроскопічний рівень – рівень цементного каменю, встановлює фазовий склад нових утворень, види та характер пористості;

2) макроскопічний рівень – рівень бетону, що встановлює вигляд та властивості цементного каменю, заповнювача, фіброволокна та співвідношення між ними, однорідність розподілу фібри за об'ємом фібробетону.

При підвищенні техніко-економічного ефекту та універсальності бетонних матеріалів передбачають як удосконалення характеристик бетону, так і розвиток виробництва модернізованих конструкційних матеріалів, до яких відносяться дисперсно-армовані бетони з зібраними найкращими якостями різних складових.

Механічні властивості фібробетонів найбільш повно відображають їх міцносні та деформативні характеристики.

Особливість формування контактів між фіброволокном та цементним тістом характеризується наявністю капілярних сил поверхневого натягу, це сприяє прилипанню до поверхні фібрових волокон за рахунок мікрочастинок, що мають розмір від кількох мікрон до 1 – 2 мм. Завдяки капілярному зчепленню створюються структурні елементи, що зміцнюються в процесі теплової обробки через стиснених умов твердіння – це призводить до зміни структури матриці композиту [28].

На рисунку 1.7 представлено структуру фібробетону.



Рисунок 1.7 – Структура фібробетону

Фіброволокно знижує показник сумарної проникності бетону при зменшенні діаметра пор (середніх та максимальних), це покращать його опір до агресивних середовищ. Також фіброва арматура сприяє підвищенню опору бетону при багаторазовому, тривалому завантаженні та при додаванні аморфної металевої фібри відбувається збільшення міцності на стиск, розколювання, зріз та вигин [13].

За даними, наведеними у вітчизняній та іноземній літературі [14, 16], встановлено, що за допомогою дисперсного армування незалежно від виду фібри, досягається підвищення ударостійкості бетону в декілька разів. Також вважається, що показник підвищення опору ударним впливів залежить від геометричних розмірів застосовуваного фіброволокна, відсотка армування та технології виготовлення конструкції [14].

Характеристики впливу фіброволокна на ударостійкість наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Кількість фібрового волокна та його вплив на ударну стійкість фібробетонів

Вид фіброволокна	Показник об'ємного відсотка армування	Розмір фібро-волокна	Ударна міцність, Дж/см	Коеф. ефектив-ності
Бетон без фібри	-	-	10,0	1,0
Комплексні капронові нитки, відрізки	0,1	10x0,02	11,5	1,1
	0,92		30,0	3,0
	1,84		52,0	5,2
	2,8		65,0	6,5
	3,7		74,0	7,4
Комплексні капронові нитки, відрізки	0,1	20x0,2	12,0	1,2
	0,92		48,0	4,8
	1,84		75,0	7,5
	2,8		95,0	9,5
	3,7		87,0	8,7
Сталеве фрезероване фіброволокно (волокнисті анкери за довжиною)	2,92	36x0,6	97,5	9,8
Сталеве фіброволокно з дроту (круглий перетин, волокнисті анкери по довжині)	1,35	50x0,5	70,0	7,0
Сталеве токарне фіброволокно	5,07	11x0,16	261,0	26,1

Характеристики механічних властивостей фібробетонів дозволяють застосовувати його для конструкцій, що піддається динамічним впливам. Також дисперсно-армований бетон придатний для виробництва тонкостінних конструкцій з досить високою довговічністю [29].

У дисперсно-армованих бетонах сприйняття розтягуючих волокон бере на себе фіброволокно, за рахунок цього посилюються кути і торці фібробетонних конструкцій, сприяє зниженню усадки та підвищенню тріщиностійкості. Також допомагає одержати бетону додаткову жорсткість і збільшити характеристики міцності, це дає можливість розробляти конструкції, які здатні витримувати високі навантаження [23].

Властивості бетону залежать від довжини та відношення довжини до діаметру фіброволокон. За теорією довгі фіброволокна з великим співвідношенням довжини до діаметра краще, ніж короткі. Зі збільшенням довжини фібри зростає вплив на показники міцності бетону в цілому. Однак при довгих волокнах погіршуються умови приготування фібробетону вони гірше розподіляються у бетоні. У зв’язку з цим має дотримуватися умова - довжина волокна повинна перевищувати подвійний діаметр найбільш великого наповнювача [26].

У цій роботі розглядаються самоущільнювальні та дрібнозернисті фібробетони на основі металевої, поліпропіленової фібри та відходів виробництва.

Самоущільнювальні бетони мають здатність заповнювати форму навіть у густоармованих конструкціях та ущільнюються під впливом власної ваги, без застосування віброущільнення. Даний вид бетону скорочує час будівництва, забезпечуючи високу якість поверхні виробів, зниження рівня шуму та додаткової обробки.

Область застосування бетонів, що самоущільнюються: висотне будівництво; реставрація та посилення конструкцій; виробництво збірного залізобетону та ін.

Основна відмінність дрібнозернистих бетонів від звичайних марок бетонів - обмеження розмірів зерен компонентів, по верхній межі розмір заповнювача становить 3 – 5 мм. Дрібнозернисті бетони мають однорідну структуру та його відносять до групи важких бетонів. Досягнення характеристик міцності здійснюється за рахунок застосування цементу

високих марок, не нижче М400, мінімального водоцементного відношення, додавання спеціальних домішок. Щільність зерен має бути в межах 2000 – 2800 г/см^3, а частка цементу має перевищувати 750 кг/м^3, згідно стандартів. Зменшення цементу веде до втрати міцностних характеристик, а збільшення призводить до подорожчання суміші і більшої потреби в обсязі води для замішування, що негативно позначається на робочих характеристиках і призводить до зайвої пористості.

Застосування таких бетонів при виробництві конструкцій має бути економічно обґрунтовано.

Для цього необхідно дослідити основні закономірності та процеси утворення структури фібробетонів на основі фіброволокна з відходів виробництва, розробити склад фібробетону із включенням даних відходів, визначити їх фізико-механічні характеристики та отримати склади, що мають масовий попит та споживання на будівельному ринку за рахунок високої гомогенізації компонентів суміші.

Найбільш поширеним в’яжучим для виготовлення дрібнозернистих і самоущільнюваних фібробетонів є портландцемент. Його основним компонентом рідкої фази у процесі твердіння, що впливає на фіброволокна, є гідроксид кальцію [18].

Найкращі результати по міцності на стиск показують цементи з підвищеним вмістом C_3S (щонайменше 50%) [15].

Однією з умов отримання таких фібробетонів із високими фізикомеханічними характеристиками є відмова від великого заповнювача, а дрібний заповнювач повинен мати уривчастий зерновий склад [18]. При цьому повинен дотримуватися такий гранулометричний склад заповнювача, який забезпечить упаковку всіх компонентів зернистого бетонного каркасу суміші. Даний склад характеризує рівномірний розподіл волокон, ніж суміш на великому наповнювачі.

Показники якості фібробетонів залежать від структури та форми зерен, щільності, твердості та міцності, залежать як від хімічного складу, так і від

мінералогічного складу заповнювача [22].

Перспектива та ефективність удосконалення структури фібробетонів полягає у широкому використанні різних органічних та неорганічних добавок. Модифікуючі добавки впливають на процеси гідратації та кристалізації, тобто на структуру твердого цементного каменю та змінюють властивості бетону. Номенклатура застосовуваних добавок дуже велика.

Найбільш поширеними вважаються зола – винесення ТЕС, мікрокремнезем, метакаолін, які зв’язують гідрат окису кальцію в гідросилікати кальцію у процесі твердіння цементу. За рахунок цього значно підвищується міцність та довговічність бетонів.

Використання даних добавок ефективно в комплексі з гіперпластифікаторами та фіброволокнами.

Таким чином, вважається за доцільне проведення експериментальних досліджень властивостей самоущільнюваних дрібнозернистих бетонів, армованих металевими, поліпропіленовими волокнами, а також відходами виробництва, основних закономірностей та процесів утворення структури фібробетонів на їх основі.

Поряд із цим високоефективним вважається розробка складу фібробетону з включенням відходів промислового виробництва, що має високі фізико – механічні характеристики, та отримання складу, що має масовий попит та споживання на будівельному ринку, за рахунок високої гомогенізації компонентів суміші

В даний час подальше вдосконалення технологій дисперсно-армованих бетонів допустимо за рахунок розвитку номенклатури композитного фіброволокна різного виду та властивостей, які володіють рядом значних переваг, що дозволяють знайти сфери нового застосування при виробництві конструкцій та виробів.

Економічна ефективність застосування конструкцій з фібробетону досягається завдяки покращеним властивостям, які набувають конструкції з впровадженням у неї фіброволокна, а також шляхом зміни технологій

виробництва та зведення. Це сприяє збільшення терміну служби конструкцій та зниження витрат на функціонування конструкцій упродовж певного терміну.

Таким чином, підтвердження доцільності використання дисперсно-армованих бетонів виходить із правильного розуміння роботи конструкцій під навантаженнями, оцінки модернізованих властивостей після впровадження фіброволокна різного виду і виходить із досвіду виробництва та експлуатаційних параметрів конструкцій.

Аналіз даних відповідно до технічної літератури та даних, отриманих в результаті проведення власних попередніх експериментів, дає можливість формулювання наступних висновків та результатів дослідження:

- недоліками бетонів є низький показник міцності на розтягування та тріщиностійкість, що призводить до крихкого руйнування конструкцій під навантаженнями;

- дисперсне армування фіброволокнами різного виду та розмірів сприяє покращенню характеристик міцності та деформації.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАСТОСОВУВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІБРОБЕТОНІВ

2.1 Властивості та характеристики застосовуваних для виробництва фібробетонів матеріалів

Дослідження експериментальної частини проводились у лабораторії кафедри «Промислове та цивільне будівництво» Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. У роботі застосовувалися різні методи дослідження матеріалів для фібробетонів відповідно з вимогами чинних державних стандартів.

Для виконання експериментальних досліджень використовувалися наступні матеріали:

1) Портландцемент.

а) Під час проведення досліджень як в'яжучого було використано портландцемент ТОВ «Запоріжбуддеталь» тип ПЦ І з класом міцності 42,5Б (М500-Д0).

Цей цемент є швидкотверднучим цементом загальнобудівельного призначення ПЦ-500 Д0 і має підвищену міцність кінцевої конструкції, що становить 500 кг на 1 $см^2$.

Відмінною рисою портландцементу ТОВ «Запоріжбуддеталь» ПЦ І 42,5Б є:

- терміни схоплювання становлять ≥ 60 та ≤ 160 хвилин з моменту приготування робочої суміші;
- добавки в цементі ПЦ-500 Д0 відсутні;
- екологічно безпечний;
- цемент ПЦ-500 Д0 використовується у суміші з будівельним піском;
- рекомендується співвідношення ц/п 1:3 суміш піску з ц/в 5:2;

- при зберіганні в сухому приміщенні, при температурі вище +5°С, зберігає свої характеристики до 90 діб від дня виготовлення.

Характеристики портландцементу ТОВ «Запоріжбуддеталь» ПЦ І 42,5Б наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристика портландцементу ТОВ «Запоріжбуддеталь» ПЦ І 42,5Б

Найменування характеристики	Од. вим.	Портландцемент з добавками
Міцність у віці 2 доби	МПа	
- вигин		4,55±0,2
- стиск		22,0±2,0
Міцність у віці 28 діб	МПа	
- вигин		8,7±0,3
- стиск		51,0±2,0
Питома поверхня	$м^2/кг$	350±20
Масова частка додаткового компоненту (опока)	%	4,0±1,0
Вміст оксиду сірки SO_3	%	3,5±0,5
Нормальна густина цементного тіста	%	27,0±1,0
Терміни схоплення	Час: хвилина	
- початок		2:40±0:20
- кінець		3:50±0:20

б) Портландцемент ПрАТ «Івано-Франківськцемент» CEM II/A-LL 42,5 R, використаний у дослідженнях, є нормальнотвердіючим з класом міцності 42,5, містить до 5% вапняку як допоміжний компонент. Вапняк натурального походження, тобто інертна мінеральна добавк-наповнювач до цементу, що покращує структуру цементного каменю та реологічні властивості цементу.

Відмінною рисою портландцементу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» CEM II/A-LL 42,5 R є:

- низький вміст CI приблизно 0,01%, по відношенню до норми 0,1%. Це сприяє збільшенню терміну експлуатації за рахунок зменшення корозії

арматури у бетоні;

- низький вміст лугів R_2O приблизно від 0,4% до 0,5%, збільшується стійкість до тріщиноутворення;

- оптимальний вміст C_3A від 7% до 7,5%;

- нормальна густина від 25% до 26%;

- середня тонкість помелу за Блейном 3440 $см^2/г$.

Мінералогічний склад клінкеру для виробництва портландцементу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» CEM II/A-LL 42,5 R:

- C_3A - 7,5%;

- C_3S - 58,0%;

- $C_3A + C_4AF$ - 20,0%;

- R_2O - 0,4%.

Характеристики портландцементу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» CEM II/A-LL 42,5 R наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Характеристика портландцементу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» CEM II/A-LL 42,5 R

Найменування характеристики	ПЦ з добавками
Клас міцності при стиску, 28 діб	42,5
Підклас по міцності на стиск, 2-7 доби	Нормальнотвердіючий
Нормативний документ	ДСТУ Б В.2.7-46:2010
Міцність на стиск у віці 2 доби, не менше (МПа)	10
Міцність на стиск у віці 7 діб, не менше (МПа)	Не нормується
Міцність на стиск у віці 28 діб, не менше (МПа)	42,5
Міцність на стиск у віці 2 доби, не більше (МПа)	62,5
Початок тужавлення, (хв) не раніше	60

2) Заповнювачі.

В якості дрібного заповнювача у дослідженнях фібробетонів використовувалися дрібний пісок Балівського родовища та великий пісок Сухачівського родовища.

а) Балівський річковий пісок за ДСТУ Б В. 2.7-232:2010 «Будівельні

матеріали. Пісок для будівельних робіт».

Показники Балівського піску наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Характеристики річкового Балівського піску

Найменування характеристики	Позначення	Од.вим.	Значення
Модуль крупності	М кр.	Мм	1,33
Вміст пилуватих та глинистих часток	ВПіГЧ	%	0,7

Вміст пилоподібних та глинистих частинок у піску Волзького родовища - 0,7% за масою (норматив за ДСТУ Б В. 2.7-232:2010 до 6%). Глина в грудках відсутня.

б) Великий пісок Сухачівського родовища з модулем крупності

М кр. = 3,53 за ДСТУ Б В. 2.7-232:2010 «Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт».

Гранулометричний склад річкового Балівського піску та піску Сухачівського родовища представлено таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Гранулометричний склад річкового Балівського піску та Сухачівського піску

Найменування показника	Од. вим.	Вид піску	
		1	2
Насипна густина	кг/м^3	1470	1562
Гранулометричний склад, мм:	%	Залишки (%) на ситах (часні/повні)	
5		-	8,0/8,0
2,5		0,4/0,4	31,0/39,0
1,25		0,4/0,8	19,0/58,0
0,63		1,2/2,0	16,9/74,9
0,315		30,0/32,0	17,4/92,3
0,16		66,0/98,0	6,9/99,2
< 0,16		2,0/100	0,8/100
Модуль крупності, Мкр	мм	1,33	3,53

Згідно з таблицею 1 ДСТУ Б В.2.7-32-95 «Будівельний матеріал. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови» річковий пісок Балівського родовища за значенням модуля

крупності відноситься до групи піску «дуже дрібний», пісок Сухачівського родовища – «підвищеної крупності». Повний залишок у відсотках по масі на ситі № 0,63 становить:

- пісок Балівського родовища - 2%;

- пісок Сухачівського родовища - 74,9%;

що відповідає значенням, зазначеним у таблиці 2 ДСТУ Б В.2.7-32-95 «Будівельний матеріал. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови».

Пісок Сухачівського родовища з групою піску «підвищеною крупності» відноситься до II класу піску згідно з ДСТУ Б В.2.7-32-95 та ДСТУ 9208:2022 «Бетони важкі. Технічні умови».

в) В якості великого заповнювача для виготовлення фібробетонів був використаний щебінь із гранодіоритів.

Щебінь із щільних гірських порід – гранодіоритів із фракцією 5 – 10 мм за ДСТУ Б В.2.7-75-98 «Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови». Технічні характеристики щебеню з гранодіоритів Запорізького щебеневого комплексу представлені у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Технічні характеристики щебеню з гранодіоритів

Найменування технічної характеристики	Значення технічної характеристики
Марка по дробимості	М1400
Вміст зерен пластинчатої (лускової) та голковатої форми	I група (до 10%)
Марка за стираністю	І 1
Насипна густина	1470 кг/м^3
Морозостійкість	F 300
Питома ефективна активність природних радіонуклідів	Менше 370 Бк/кг, 1 клас для любих видів будівництва

Відсутній вміст глини в грудках, зерен слабких порід та шкідливих домішок.

Хімічний склад щебеню наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Хімічний склад щебеню із гранодіоритів

Хімічний елемент						
SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
Вміст у %						
61,07	5,90	17,23	9,13	3,44	0,66	0,30

3) Фіброволокно.

Для дисперсного армування бетонів застосовувалися такі види фіброволокна:

а) Фібра хвильового профілю ФСВ-В-0,3/15 ПАО «Виробниче Об'єднання «СТАЛЬКАНАТ-СИЛУР» м. Одеса відповідно до EN 14889-1 Фібра із сталевого дроту для армування бетону.

Характеристики фібри хвильового профілю наведені у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 - Характеристики фібри хвильового профілю ФСВ-В-0,3/15

Найменування характеристики	Значення	Відхилення	Од.вим.
Діаметр	0,3	± 0,05	мм
Довжина	15	± 5	мм
Ширина кроку гофри	4-5	-	шт

Металева фібра хвильового профілю ФСВ-В-0,3/15 представлена рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Фібра хвильового профілю

б) Волокно поліпропіленове мікроармуюче довжиною L = 12 мм, ТОВ «СІЛАЙТ ГРУП» міста Дніпро.

Волокно виготовлене з високомодульного модифікованого полімеру діаметром 20 - 25 мкм. Міцність на розрив не менше 450 МПа, модуль пружності не менше 5100 МПа та температура плавлення 160 °С.

Дана поліпропіленова фібра: запобігає появі усадкових тріщин; суттєво збільшує ударну міцність, геометричну точність та якість поверхонь виробів; знижує брак; підвищує стійкість до стирання та опилення; підвищує морозостійкість та водонепроникність; підвищує міцність на стиск та розтягування при вигині; збільшує адгезійні властивості; підвищує пластичні властивості.

Поліпропіленове волокно виробництва ТОВ «СІЛАЙТ ГРУП» представлено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Волокно поліпропіленове мікроармуюче завдовжки L=12, ТОВ «СІЛАЙТ ГРУП»

в) Поліамідні волокна ТОВ «Budmat», м. Київ.

Поліамідна нитка виробництва ТОВ «Budmat» - низькомодульні волокна з характерним для них великим відносним подовженням при розриві діаметром 0,8 мм та довжиною L = 10мм. Щільність волокна 0,9 $см^3$, міцність на розтяг не менше 720 МПа, модуль пружності 5000 МПа.

Характерними рисами таких волокон є міцність, жорсткість, еластичність, що характерно для армування тонких елементів на основі мінеральних в'яжучих речовин. Поліамідна фібра стійка до лужних середовищ і звичайних розчинників, сприяє хорошому опору до стирання, покращує капілярну упаковку, що веде до зменшення об’єму води, що поглинається бетоном, температура плавлення становить 250 °С.

Поліамідне волокно виробництва ТОВ «Budmat» представлено на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Поліамідне волокно

4) Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280» на основі полікарбоксилатів.

Є високоефективним рідким, готовим до застосування, гіперпластифікатором. Цей гіперпластифікатор виготовлений на основі полікарбоксилатів. Належить до розряду «швидких» гіперпластифікаторів, так як має прискорюючий ефект і сприяє швидкому набору міцність бетону. Продукт не горючий та фізіологічно нешкідливий. Рідина червоно-коричнева із щільністю при 20 °С – 1,065±0,030 г/мл. pH - 7 - 10.

«STACHEMENT 2280» застосовується для зниження дозування цементу, що є цільовою функцією задачі оптимізації складу фібробетонної суміші. Слід зазначити, що застосування цього гіперпластифікатора важливо як з економічної точки зору, так і з точки зору підвищення характеристик фібробетону.

Переваги гіперпластифікатора «STACHEMENT 2280»:

- економія цементу та зниження собівартості бетону;
- підвищення ранньої та кінцевої міцності, водонепроникності та довговічності бетону;
- підвищення стійкості бетону до кліматичних та хімічних впливів;
- зниження кількості води замішування;
- економія енергії при обробці бетонної суміші;
- економія часу та теплової енергії при термічній обробці бетону;
- перешкоджає залученню зайвого повітря до бетону;
- дає бетонній поверхні якісний вигляд, не змінює колір бетону і не створює вицвіти;
- підвищує оборотність опалубки;
- підходить для армованих конструкцій, оскільки не містить хлоридів.

5) Наповнювач цементу.

Наповнювачі цементу мають великий вплив на пластичність і водоутримуючу здатність бетонної суміші. Зерна наповнювача беруть участь у процесі формування кристалічної структури цементного каменю. Введення

наповнювача сприяє прискоренню процесу гідратації цементних зерен.

Як наповнювач у дослідженнях використовувався мікрокремнезем.

Мікрокремнезем – дрібні кулясті частинки аморфного кремнезему. Середня питома поверхня складає 20м^2/г, гранулометричний склад становить 0,1 мікрона, що у 100 разів менше середнього розміру цементного зерна.

Частки мікрокремнезему мають сферичну форму та гладку поверхню. Діоксид кремнію в аморфній формі – основний компонент відходу.

Хімічний склад мікрокремнезему представлений у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Хімічний склад мікрокремнезему

Хімічний елемент								
SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	C	S
Вміст у %								
90-92	0,69	0,68	0,85	1,01	1,23	0,61	0,98	0,26

Значення показника pH водної суспензії мікрокремнезему становить у середньому – 7,74.

Мікрокремнезем сприяє зменшенню витрати цементу до 200 – 450 кг/м^3, має високу міцність на стиск 60 - 80 МПа і вище 80 МПа для дрібнозернистих бетонів, підвищує антикорозійну стійкість, знижує водонепроникність на 50%, що підвищує довговічність. Мікрокремнезем як і всі пуцоланові матеріали, вступає в реакцію з гідроокисом кальцію $Ca(OH)_2$, що утворюється при гідратації клінкерних мінералів цементу з утворенням низькоосновних гідросилікатів кальцію із співвідношенням CaO/SiO_2 – 0,9 – 1,3:

C_3S (C_2S) + H_2O → C-S-H + $Ca(OH)_2$

$Ca(OH)_2$ + SiO_2 + H_2O → C - S - H

Висока чистота та підвищена дисперсність мікрокремнезему сприяє більш ефективній та швидкій реакції.

6) Вода використовувалася відповідно до ДСТУ Б В.2.7-273:2011 «Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови».

2.2 Застосовуване обладнання в ході дослідження

У ході експериментального дослідження даної теми застосовувалися такі прилади, інструменти та обладнання:

1. Для вивчення фізико – механічних властивостей та освоєння методу визначення якісних показників щебеню використовувалися наступні прилади, інструменти та обладнання: ваги з різновагами; мірні циліндри; набір стандартних сит; штангенциркуль; прес гідравлічний; металеві лінійки; циліндри діаметром 75 та 150 мм.

2. Під час проведення випробувань піску відповідно до вимог ДСТУ та до пісків, що застосовуються як заповнювачі розчинів і бетонів, використовувалися такі прилади, інструменти та обладнання: набір стандартних сит; посудина місткістю 1 $дм^3$; совок; ваги торгові з набором гирь; мензурка місткістю 100 – 500 $см^3$;

3. Для розрахунку співвідношення цементу, води, піску та заповнювача для отримання фібробетонної суміші із заданою зручноукладальністю для дослідження властивостей фібробетонів застосовувалися наступні прилади, інструменти та обладнання: бойок для приготування бетонної суміші; дві лопати; стандартний конус; багнет; форма на три зразки – куба 70х70х70 мм; форма на три зразки – призми розміром 40х40х160 мм; вібромайданчик; струшуючий столик; ваги; прес гідравлічний; камера для витримування фібробетонних зразків у нормальних умовах твердіння.

2.3 Технологія виготовлення зразків

Як матриця для отримання фібробетонних зразків використовувався дрібнозернистий бетон, що самоущільнюється, який дозволив забезпечити високий ступінь насичення волокнами та високу дисперсність армування.

При приготуванні фібробетонної суміші було визначено витрату матеріалів на кожен заміс об'ємом необхідним для виготовлення зразків – кубів та зразків – призм певної кількості.

Кількість сухих матеріалів (портландцемент, заповнювачі, мікрокремнезем, фіброволокно), розрахованих на заміс, зважували на терезах з похибкою ± 1 г. З такою самою похибкою відміряли воду мірним циліндром.

Заповнювач, цемент та фіброволокно змішували у сухому стані до отримання гомогенної суміші, зачиняли необхідною кількістю води та перемішували до утворення однорідної маси.

До випробування у віці 7, 14 та 28 діб зразки витримували в нормальних умовах твердіння.

2.4 Методи випробувань вихідних матеріалів та фібробетонів

В ході виконання магістерської роботи використовувалися стандартні методи випробувань та досліджень сировинних матеріалів та виробів з їхньої основі.

Пісок, як дрібний заповнювач для фібробетону, досліджувався відповідно до ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови та ДСТУ Б В.2.7-232:2010 Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань.

Щебінь із гранодіоритів випробовувався відповідно до ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови та ДСТУ 9179:2022 Щебінь та гравій зі щільних гірських порід і металургійних шлаків для дорожнього будівництва. Методи фізико-механічних випробувань.

Приготування фібробетонних сумішей здійснювалось згідно з Рішенням від 23.02.2006 № 10 Про проект Зміни № 1 ДСТУ Б В.2.7-43-96 «Бетони важкі. Технічні умови», ДСТУ Б В.2.7-96-2000 «Суміші бетонні. Технічні умови», ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» та ДСТУ Б В.2.7-221:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Класифікація і загальні технічні вимоги».

Виконувалися випробування міцності зразків на стиск та розтягування при згинанні відповідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками».

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ СТРУКТУРИ ФІБРОБЕТОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІБРИ РІЗНОГО ВИДУ

В представленій магістерській роботі досліджувалися фізико-механічні властивості дрібнозернистого фібробетону з використанням металевої, поліпропіленової фібри та фібри з поліамідних волокон залежно від складу бетонної суміші та ступеня армування.

3.1 Дослідження властивостей бетону з металевими армуючими волокнами

З метою вивчення фібробетону з використанням металевого фіброволокна були виготовлені фібробетонні зразки I серії розміром 70х70х70 мм та 40х40х160 мм.

Як матриця для отримання фібробетонних зразків використовувався дрібнозернистий бетон, що самоущільнюється. Усі зразки I серії мали однаковий склад матриці: Ц : П = 1:1,39 при В : Ц = 0,5.

Для виготовлення фібробетонних зразків партій 1,3,4,5,6,7,15 та 16, були використані портландцемент «Запоріжбуддеталь» ПЦ I 42,5 Б, природний пісок Балівського родовища з модулем крупності $М_{кр}$ = 1,3, металеві фібри. Металеве фіброволокно вводилося до складу бетонної суміші у кількості 34 (1,6), 51 (2,3), 69 (3,1), 84 (3,9), 104 (4,6), 133 (6,0), 166 (7,4) кг/м^3 (% від маси бетонної суміші). Розплив фібробетонної суміші визначали шляхом вимірювання величини розпливу на струшуючому столі.

Склади фібробетонних сумішей з металевою фіброю наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Склади фібробетонної суміші з металевою фіброю

Склад	№ партії							
	8	3	4	1	6	7	15	16
	Ц : П = 1 : 1,39							
Одиниця виміру	кг/м^3							
Цемент «Запоріжбуддеталь» 42,5 Б	757	735	737	738	723	749	718	716
Пісок «Балівський»	1051	1021	1024	1025	1004	1040	997	996
Вода	379	367	369	369	361	375	359	358
Фібра металева	-	34	51	69	84	104	133	166
В/Ц	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Середня густина, кг/м^3	2187	2157	2181	2201	2172	2268	2207	2236
Розплив конуса, см	64	66	64	62	68	60	78	76

Технологія виготовлення бетонної суміші здійснювалася шляхом ретельного перемішування компонентів бетонної суміші в сухому вигляді, з метою рівномірного розподілу фіброволокна, після чого додавали воду і знову перемішували.

При приготуванні бетонної суміші з металевою фіброю виникали певні труднощі. У процесі перемішування сухих компонентів бетонної суміші металева фібра комковалась, що в результаті призводило до нерівномірного розподілу фібри в обсязі бетонної суміші, що проілюстровано на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Приготування бетонної суміші з металевою фіброю

Виготовлені фібробетонні зразки – куби розміром 70х70х70 мм та зразки – призми розміром 40х40х160 мм з різною кількістю металевого фіброволокна перед випробуваннями витримувалися протягом 7, 14 та 28 діб у нормальних умовах твердіння.

Випробування зразків на міцність виконувались на пресі, що забезпечує максимальне навантаження 50 т.

Результати випробувань зразків на міцність при стисканні представлені в таблиці 3.2 та на рисунках 3.2, 3.3.

Таблиця 3.2 - Межі міцності при стисканні зразків фібробетону з металевою фіброю

Вік зразків	№ партії							
	8	3	4	1	6	7	15	16
	Кількість фібри, кг/м^3							
	0	34	51	69	84	104	133	166
	Межа міцності при стисканні, МПа							
7 діб	29,5	27,2	26,0	29,1	26,7	30,3	29,2	29,7
14 діб	31,2	35,0	34,2	35,3	34,0	35,5	35,8	36,5
28 діб	38,7	42,5	39,9	39,2	37,6	38,8	38,5	39,4

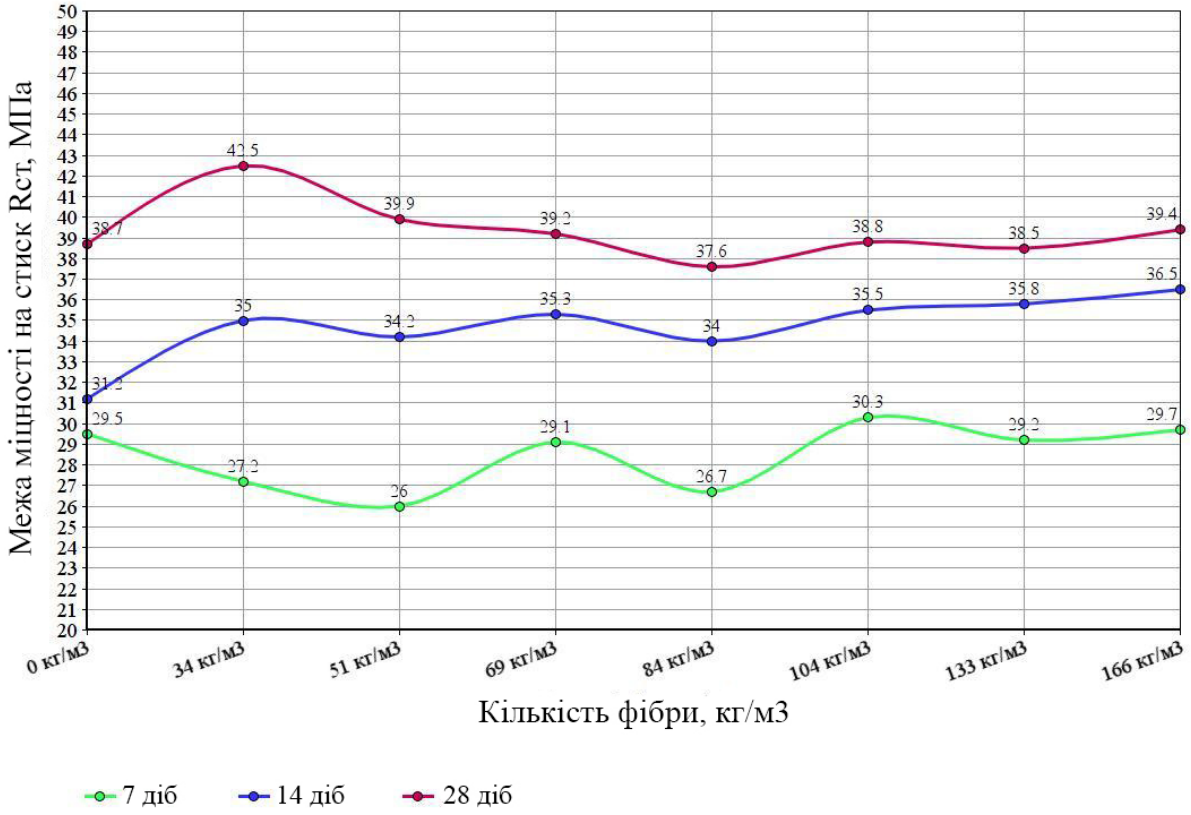

Рисунок 3.2 – Межа міцності фібробетону при стисканні від ступеня армування металевим фіброволокном

Результати досліджень (рисунок 3.2 та 3.3) показують, що найкращі характеристики міцності у віці 28 діб мають зразки дрібнозернистого фібробетону з армуванням металевою фіброю в кількості 34 кг/м^3.

Зі збільшенням кількості фібри до 84 кг/м^3 спостерігається плавне зниження міцності на 15 % порівняно з міцністю зразків із вмістом металевої фібри 34 кг/м^3. При підвищенні армування до 104 кг/м^3 фібри та більш міцність зразків фібробетону починає зростати, при вмісті фібри в бетоні кількості 166 кг/м^3 міцність зразків фібробетону досягає 39,4 МПа.

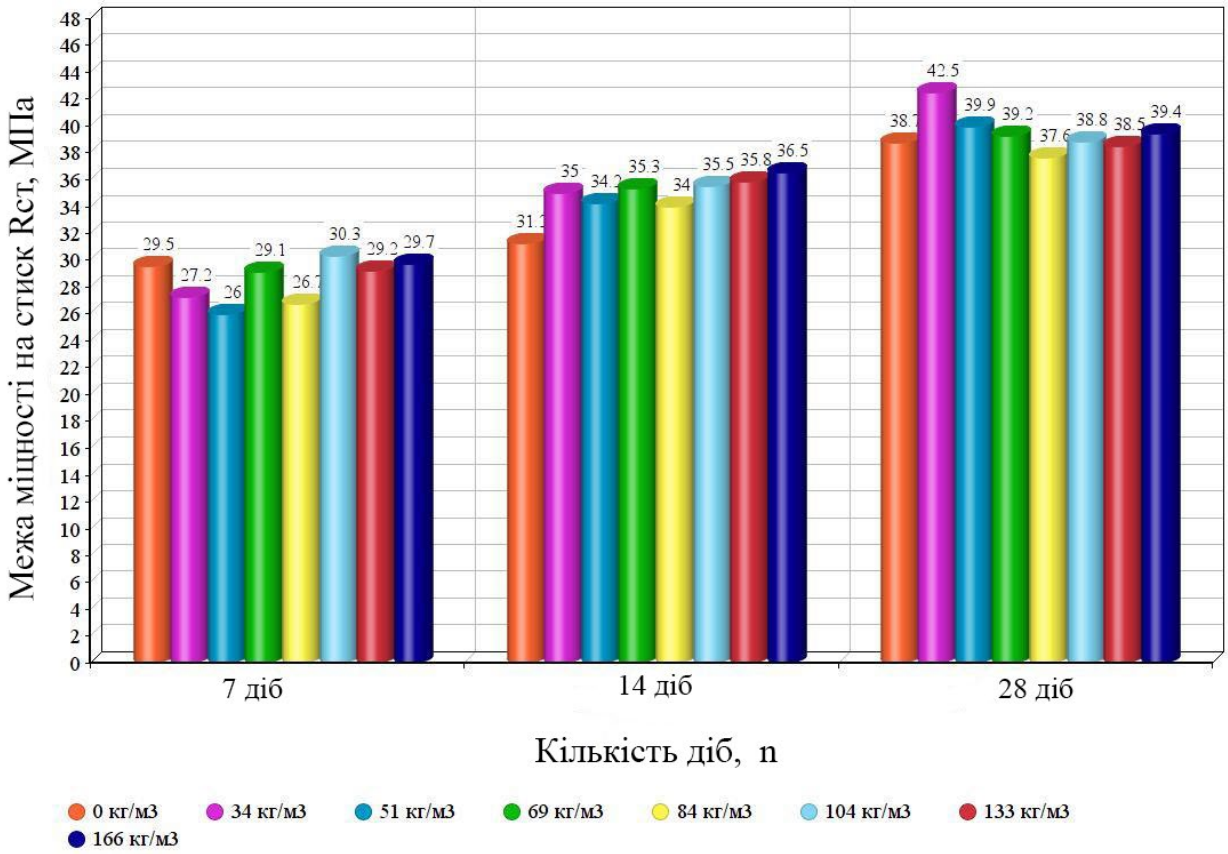

Рисунок 3.3 – Залежність міцності фібробетону при стисканні кількості у бетонній суміші металевої фібри

Випробування межі міцності фібробетонних зразків на розтягування при згинанні проводилися згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками». Установка для випробування зразків – призм представлено Рисунку 3.4.

Усі фібробетонні зразки виготовлялися на постійному водоцементному відношенні 0,5. Найбільшу міцність за таких умов формування показав склад з 1,6 % вмістом металевого волокна від маси бетонної суміші. Міцність фібробетону в 28 діб складу партії №3 з 1,6 % вмістом волокна становила 42,5

МПа, що перевищує міцність бетону контрольної партії №8 без волокна на 9% у відповідні терміни затвердіння.



Рисунок 3.4 – Установка для випробування зразків з фібробетону на вигин

Результати випробувань фібробетонних зразків на вигин металевою фіброю представлені у таблиці 3.3 та на рисунках 3.5, 3.6.

Таблиця 3.3 - Межі міцності при згинанні фібробетонних зразків з металевою фіброю

Вік зразків	№ партії							
	8	3	4	1	6	7	15	16
	Кількість фібри, кг/м^3							
	0	34	51	69	84	104	133	166
	Межа міцності при вигині, МПа							
28 діб	5,8	6,5	6,0	6,2	5,6	6,2	5,8	5,9

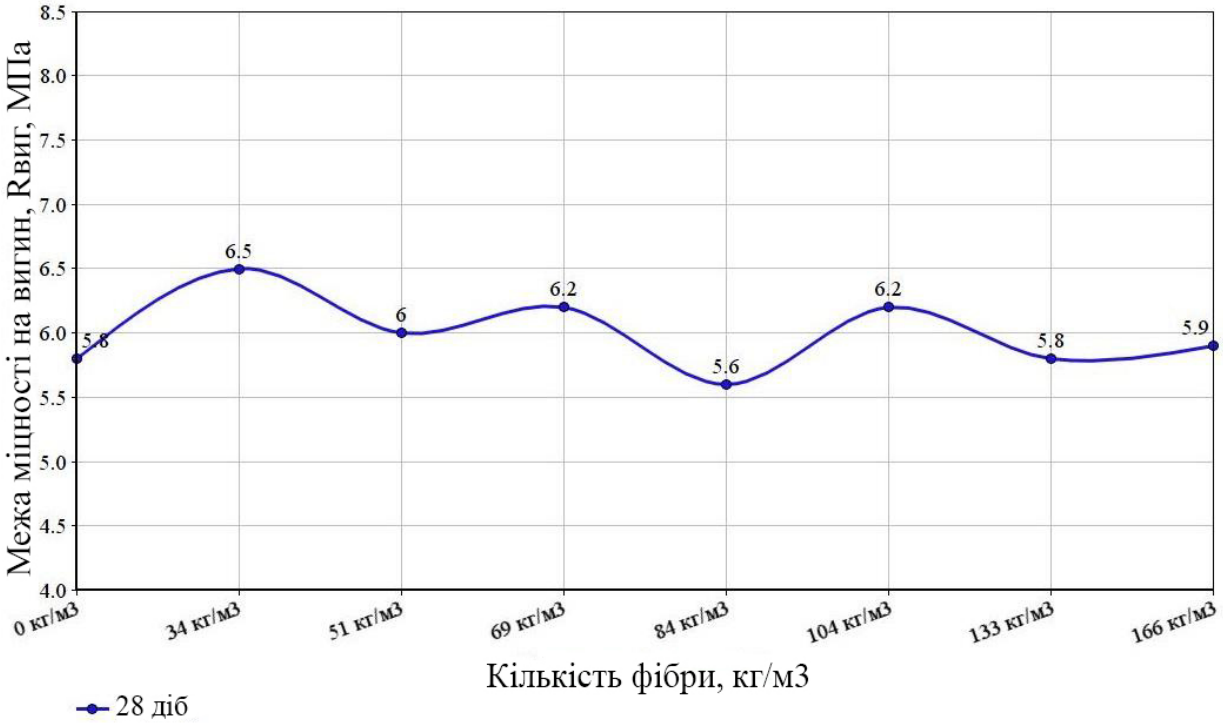

Рисунок 3.5 - Межа міцності фібробетону на вигин від ступеня армування металевим фіброволокном

Крива залежності межі міцності на вигин $R_{виг}$. (Рисунок 3.5) від ступеня армування металевим фіброволокном аналогічна кривій залежності межі міцності при стисканні $R_{ст}$. (Рисунок 3.2).

Найкращі характеристики межі міцності при згині мають зразки дрібнозернистого фібробетону з армуванням металевою фіброю в кількості 34 кг/м^3. Зі збільшенням кількості фіброволокна до 84 кг/м^3 спостерігається плавне зниження міцності на 14% порівняно з міцністю фібробетонних зразків із вмістом металевої фібри 34 кг/м^3.

При підвищенні армування до 104 кг/м^3 міцність зразків зростає при подальшому збільшенні фібри до 166 кг/м^3 міцність зразків досягає 5,9 МПа.

Характер руйнування фібробетонного зразка – призми на вигин представлений рисунку 3.7.

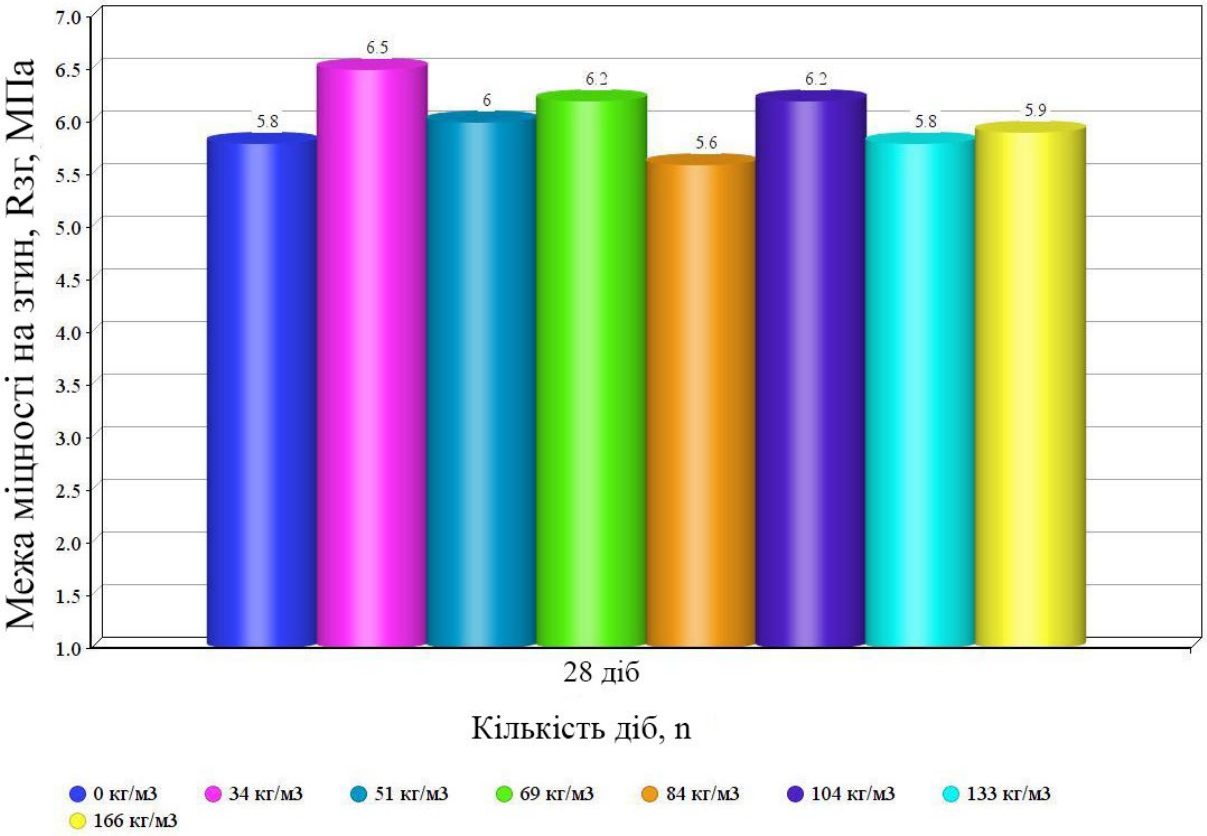

Рисунок 3.6 – Залежність міцності фібробетону на згин від кількості металевої фібри



Рисунок 3.7 – Зразок– балочка з металевою фіброю після випробування на зигин

У сучасному будівництві найбільш перспективні фібробетони, виготовлені з використанням наповнювачів цементу та гіперпластифікаторів.

Щільність фібробетону залежить від рівномірного розподілу волокон у бетонній суміші та їх правильної орієнтації в розчині. За рахунок цього виріб чинить опір зовнішнім механічним впливам.

Для підвищення зручності виготовлення фібробетонної суміші застосовували гіперпластифікатор на основі полікарбоксилатів.

У цій роботі було досліджено фібробетони з різним співвідношенням в'яжучого та заповнювача з використанням як наповнювача цементу мікрокремнезем (у кількості 30% від маси цементу) та гіперпластифікатора «STACHEMENT 2280».

При виготовленні фібробетонів II серії партій № 31 – 39 у якості в'яжучого використовувався портландцемент CEM II/A-LL 42,5R, як заповнювача – пісок Сухачівського родовища з модулем крупності Мкр. = 3,53.

Були виготовлені фібробетонні зразки зі складами: Ц : П = 1:0,67 при В : Ц = 0,43, Ц : П = 1:1,43 при В : Ц = 0,49, Ц : П = 1:2 при В : Ц = 0,49 з металевим фіброволокном.

Склади фібробетонної суміші з металевими волокнами наведено у таблиці 3.4.

Усі фібробетонні суміші мали високу рухливість – розплив конуса в діапазоні 62 – 72 см. Зі збільшенням кількості фібри рухливість бетонної суміші, тобто. розплив конуса зменшувався, досягав мінімальної величини. У зв'язку з підвищеною кількістю цементу (Співвідношення Ц : П = 1:0,67) бетонні суміші мали високу рухливість - розплив конуса до 80 см, що прирівнює їх до категорії самоущільнюються. Бетонні суміші не розшаровувалися, відрізнялися підвищеною зв'язністю, за типом бетону ці суміші відносяться до бетонних сумішам дрібнозернистого бетону.

Таблиця 3.4 - Склади фібробетонної суміші з металевими волокнами

Склад	№ партії								
	31	32	33	34	35	36	37	38	39
	Ц:П=1:0,67			Ц:П=1:1,43			Ц:П=1:2		
Одиниця виміру	кг/м^3								
CEM II/A-LL 42,5R	727	705	698	566	563	566	501	499	504
Мікрокремнезем	312	303	300	243	242	243	216	215	217
Пісок Сухачівський	487	473	468	809	805	809	1002	998	1008
Вода	451	437	433	396	394	396	346	344	348
Фібра металева	87	113	146	79	101	136	80	110	146
В/Ц	0,43	0,43	0,43	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280»	10	10	10	6	6	6	7	6	7
Середня густина, кг/м^3	2076	2041	2055	2099	2111	2157	2152	2172	2230
Розплив конуса, см	80	78	75	70	70	68	68	66	62

У ході випробувань встановлено, що зразки армовані металевою фіброю, мають ознаки пластичного руйнування (рисунок 3.8). Сама фібра не розривалася, що говорить про її надійне зчеплення з матрицею композиту. За рахунок цього підвищується термін експлуатації та безпека використання виробів із нього.



Рисунок 3.8 – Зразки фібробетонів з металевою фіброю, мікрокремнеземом та гіперпластифікатором

Результати досліджень зразків на стиск із металевою фіброю та спеціальними наповнювачами представлені в таблиці 3.5 та на рисунку 3.9.

Таблиця 3.5 – Межі міцності на стиск зразків з металевою фіброю

Вік зразків	№ партії								
	31	32	33	34	35	36	37	38	39
	Ц:П=1:0,67			Ц:П=1:1,43			Ц:П=1:2		
	Кількість фібри, кг/м^3								
	87	113	146	79	101	136	80	110	146
	Межа міцності при стисканні, МПа								
7 діб	42,7	41,6	43,3	33,8	28,5	32,3	34,7	34,3	33,3
14 діб	46,7	46	46,8	40,6	38,5	37,0	42,0	41,8	41,1
28 діб	49,9	55,5	61,0	48,9	51,3	52,7	46,8	47,4	50,1

На рисунках 3.9, 3.10, 3.11 та 3.12 показані міцності зразків бетону на стиск в залежності від кількості металевої фібри в бетонній суміші складів Ц : П = 1:0,67, 1:1,43 та 1:2,0.

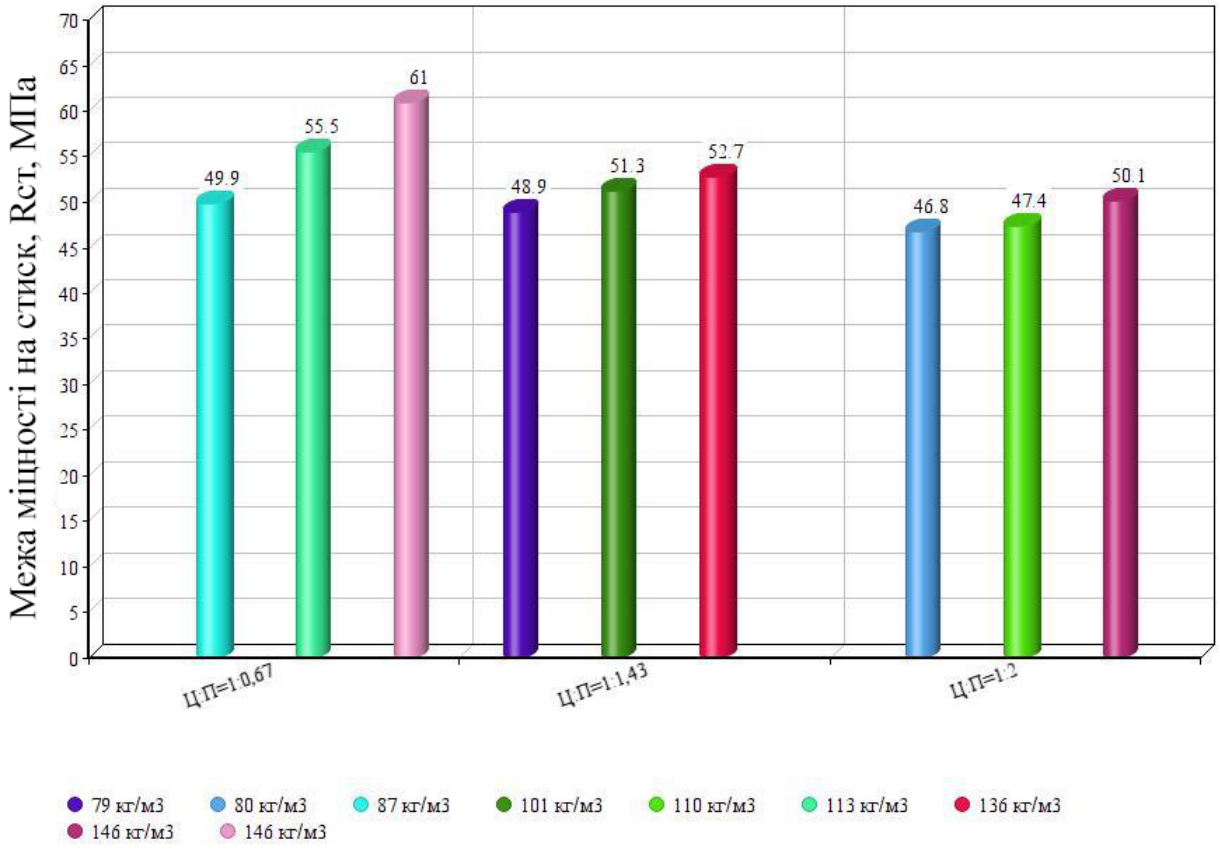

Рисунок 3.9 – Межа міцності фібробетону на стиск у віці 28 діб від ступеня армування металевим фіброволокном

Як свідчать дані рисунку 3.9, найкращі результати показують зразки

фібробетону при співвідношенні Ц: П = 1: 0,67. З збільшенням армування міцність фібробетону зростає.

При армуванні у кількості 146 кг/м^3 міцність при стисканні досягає 61 МПа, при вигині - 9,1 МПа (таблиця 3.5 та 3.6). У більш тощих фібробетонах (Ц : П = 1:1,43 і Ц : П = 1:2) при такому армуванні міцність фібробетонів при стисканні знижується відповідно на 13,6% і 17,8%, міцності при вигині знижується – на 26% та 13% не дивлячись на високий рівень однорідності. Клас отриманих фібробетонів по міцності відповідає класу В35. Фібробетони з високим вмістом цементу партії №33 (Ц : П = 1:0,67) з кількістю металевої фібри 146 кг/м^3 набирають міцність, що відповідає класу В45. Досліджувані фібробетони з металевим фіброволокном, наповнювачем цементу мікрокремнеземом і гіперпластифікатором можуть використовуватися в виробництві для виготовлення наливної підлоги промислових будівель та фундаментів під обладнання.

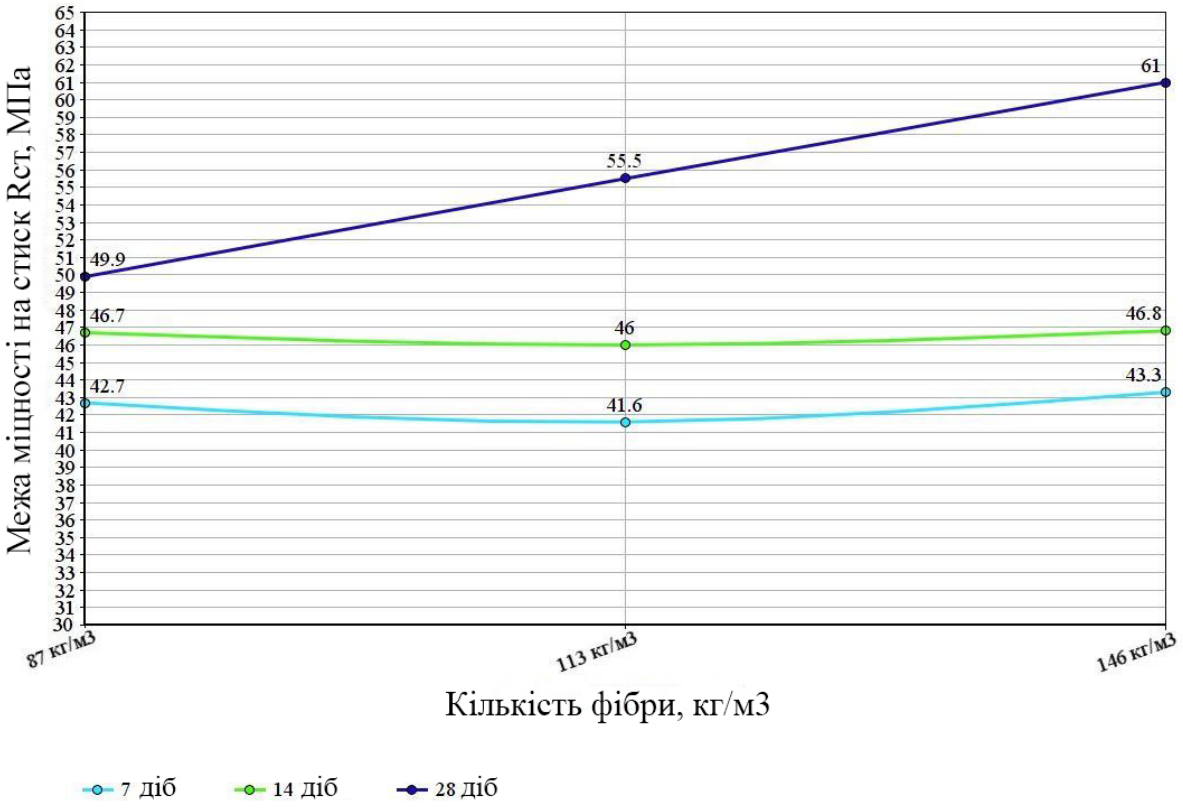

Рисунок 3.10 – Межа міцності фібробетону під час стиснення залежно від ступеня армування фіброволокном при Ц: П = 1:0,67

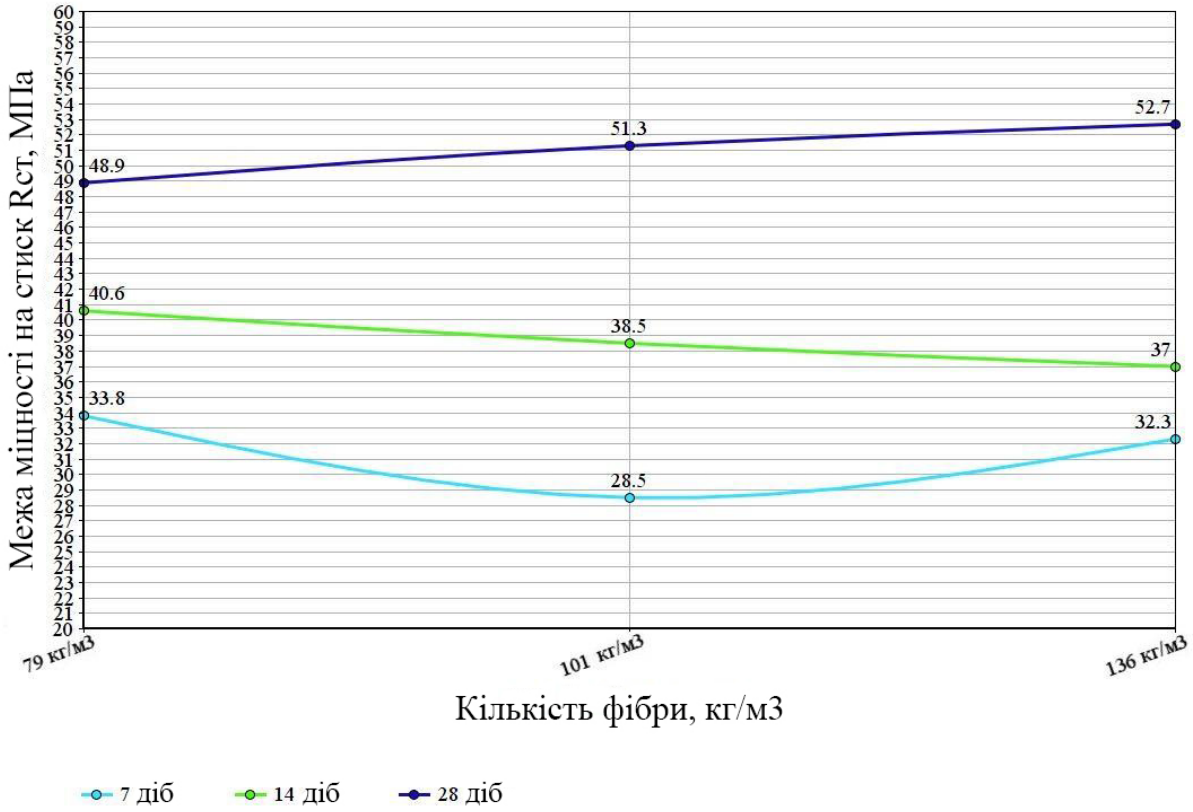

Рисунок 3.11 – Межа міцності фібробетону при стисканні залежно від ступеня армування фіброволокном при Ц : П = 1:1,43

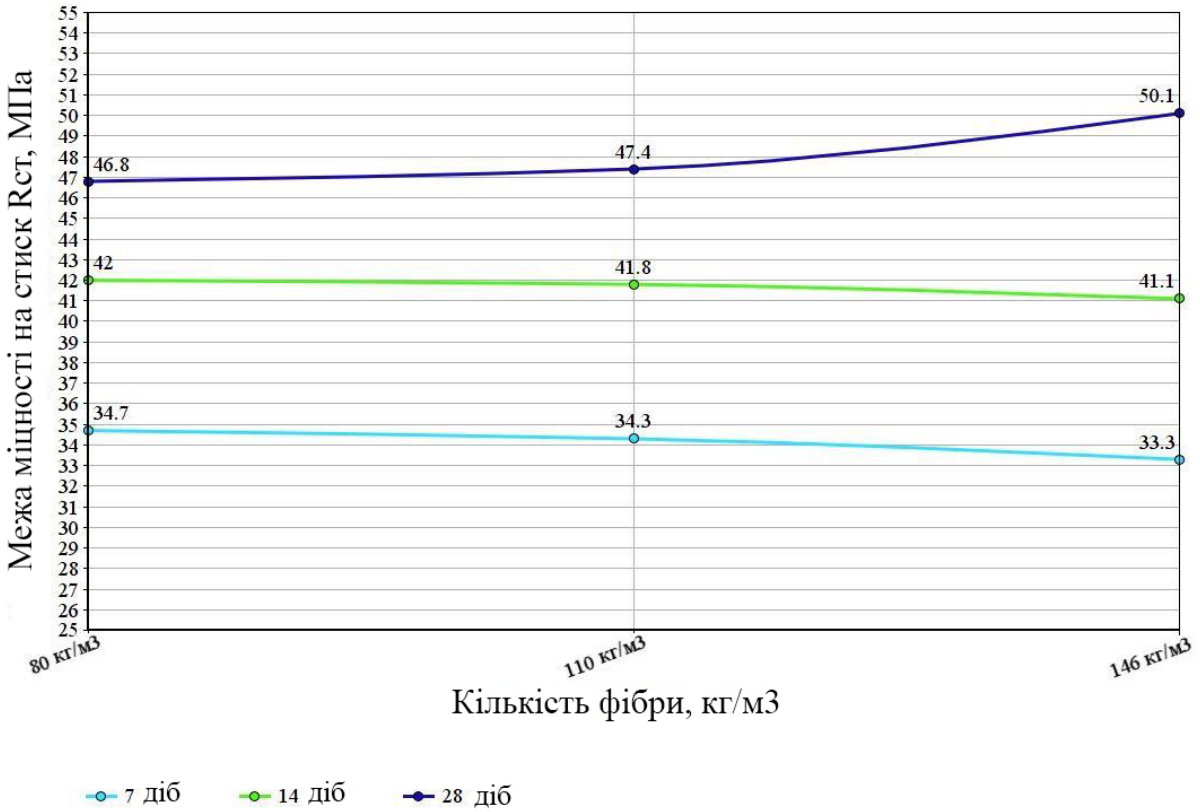

Рисунок 3.12 – Межа міцності фібробетону при стисканні залежно від ступеня армування фіброволокном при Ц : П = 1:2

Як видно з рисунка 3.10, найбільшу міцність при стисканні 28 доби мають зразки фібробетону з дозуванням фібри 146 кг/м^3, що складає 7,1% від маси бетонної суміші.

Аналізуючи дані рисунків 3.10, 3.11 та 3.12 можна зазначити, що зі збільшенням кількості металевої фібри в дрібнозернистому бетоні, його міцність плавно зростає. Зі збільшенням фібри у фібробетоні жирної суміші (Ц: П = 1:0,67) зафіксовані кращі результати набору міцності, ніж більш тощої суміші (Ц : П = 1:2).

Дослідження показали, що у семидобовому віці міцнісні показники вищі у фібробетонів з найменшим армуванням металевим фіброволокном.

Міцність фібробетонів у віці 7 діб становить 85% від марочної фібробетонів партій №31 та №34 з армуванням відповідно, кількості 87 кг/м^3 та 79 кг/м^3. Зі збільшенням кількості армуючого волокна до 136 кг/м^3 та 146 кг/м^3 міцність бетону в 7 діб складає всього 61% та 71% від марочної міцності відповідно.

Обробка міцності більш тонких фібробетонів (Ц : П = 1:2) показало, що набір міцності фібробетонів відбувається рівномірно, незалежно від кількості армуючого металевого фіброволокна та у семидобовому віці становить у межах 67% – 73% від марочної міцності.

Результати досліджень зразків на вигин із металевою фіброю представлені у таблиці 3.6 та рисунку 3.13.

Таблиця 3.6 - Межі міцності при згинанні зразків з металевої фіброю у віці 28 діб

Вік зразків	№ партії								
	31	32	33	34	35	36	37	38	39
	Ц:П=1:0,67			Ц:П=1:1,43			Ц:П=1:2		
	Кількість фібри, кг/м^3								
	87	113	146	79	101	136	80	110	146
	Межа міцності при вигині, МПа								
28 діб	7,7	8,3	9,1	7	6,8	6,7	7,3	7,7	7,9

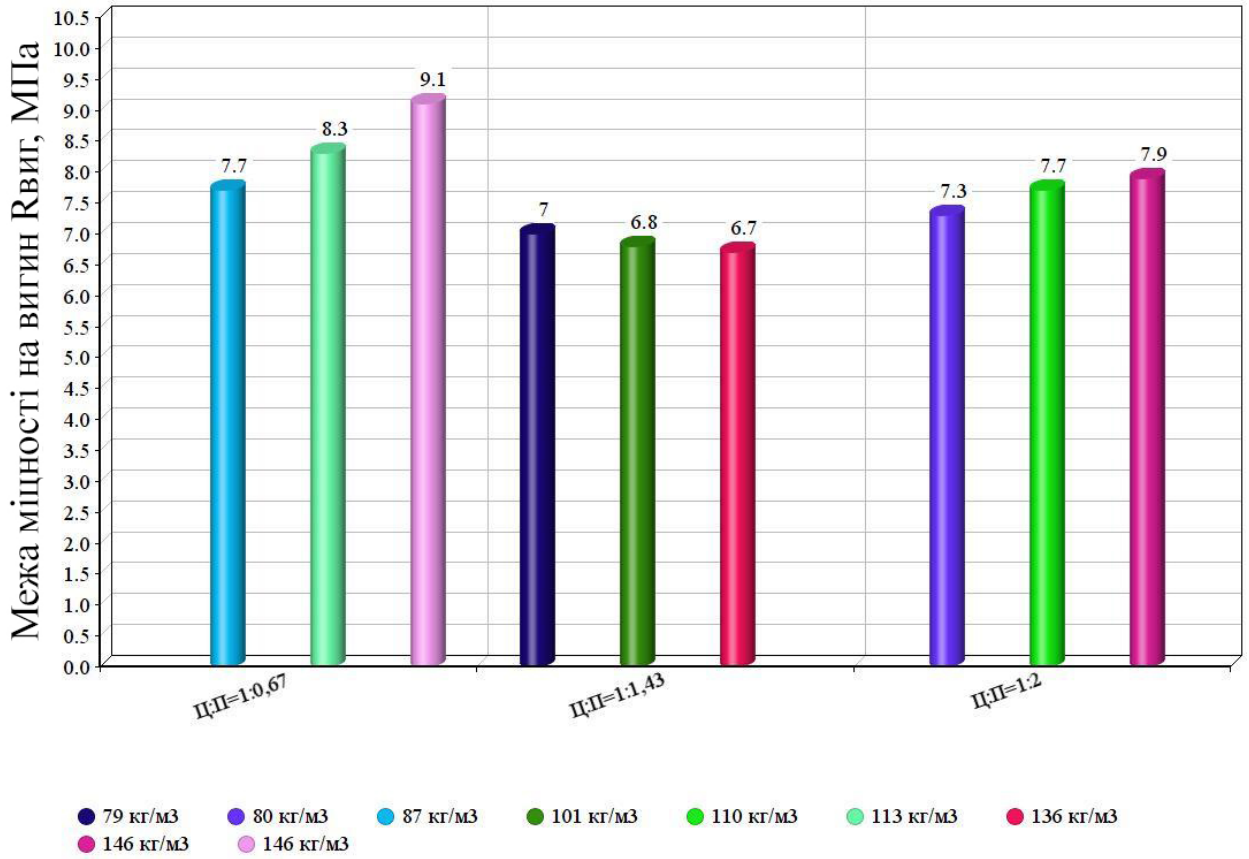

Рисунок 3.13 – Межа міцності фібробетону на вигин з різною кількістю металевої фібри

Найкращі результати за межі міцності при згинанні мають фібробетони з високим вмістом цементу (Ц : П = 1 : 0,67). Зі збільшенням кількості армуючого волокна межа міцності при згинанні фібробетону підвищується. При скороченні витрати цементу (Ц : П = 1:2) значення міцності при згинанні погіршуються незначно, порівняно з жирними фібробетонами (Ц : П = 1:0,67), всього на 5%, 7% і 15% при мінімальному, середньому та максимальному армуванні.

3.2 Дослідження властивостей бетону з поліпропіленовими армуючими волокнами

Для виготовлення фібробетонних зразків серії ІІІ партій 2, 9, 10, 11 зі співвідношенням Ц : П = 1:1,39, були використані портландцемент ТОВ «Запоріжбуддеталь», ПЦ І, природний пісок Балівського родовища з модулем крупності Мкр = 1,3, поліпропіленова фібра. Поліпропіленове фіброволокно вводилося до складу бетонної суміші у кількості 8 (0,4), 10 (0,5), 11 (0,52), 14 (0,6) кг/м^3 (% від маси бетонної суміші). Розплив фібробетонної суміші визначали шляхом вимірювання величини розпливу на струшуючому столику. Склад бетонних сумішей з поліпропіленової фіброю наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Склади фібробетонної суміші з поліпропіленовою фіброю

Склад	№ партії				
	8	9	10	11	2
	Ц : П = 1 : 1,39				
Одиниця виміру	кг/м^3				
Цемент ТОВ«Запоріжбуддеталь», ПЦ І	757	744	729	728	737
Пісок «Балівський»	1051	1033	1013	1011	1024
Вода	379	372	365	364	368,5
Фібра поліпропіленова	-	8	10	11	14
В/Ц	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Середня густина, кг/м^3	2187	2157	2117	2114	2143
Розплив конуса, см	61	52	56	58	50

Відмінною рисою виготовлення фібробетонної суміші з поліпропіленової фіброю в порівнянні з металевою фіброю є розщеплення поліпропіленової фібри на окремі частини, крім того, за рахунок поглинання поліпропіленової фіброю води, фібробетонна суміш стає менш рухливою.



Рисунок 3.14 – Приготування фібробетонної суміші з поліпропіленової фіброю

Результати досліджень фібробетонних зразків на стиск з поліпропіленової фіброю представлені в таблиці 3.8 та на рисунках 3.15, 3.16.

Таблиця 3.8 – Межі міцності на стиск зразків із поліпропіленової фіброю

Вік зразків	№ партії				
	8	9	10	11	2
	Кількість фібри, кг/м^3				
	0	8	10	11	14
	Межа міцності на стиск, МПа				
7 діб	29,5	29,2	27,2	21,3	23,4
14 діб	31,2	35,7	36,5	33,8	31,5
28 діб	38,7	42,0	39,0	38,5	33,0

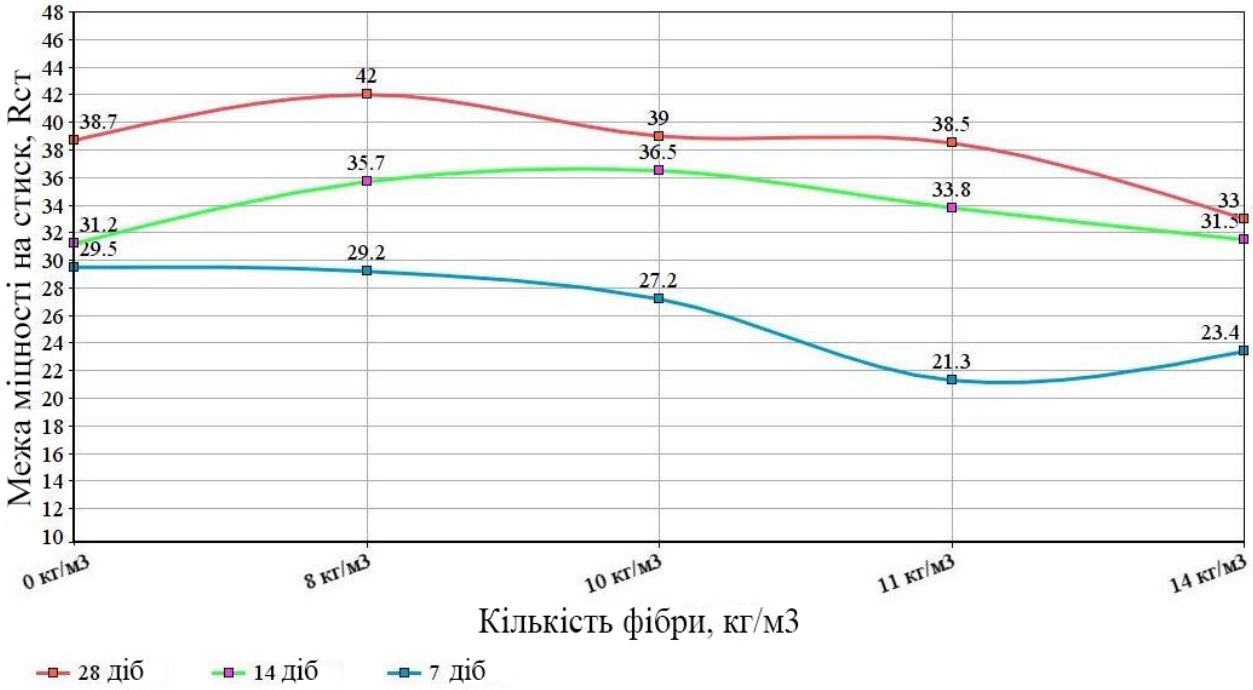

Рисунок 3.15 – Межа міцності фібробетону на стиск від ступеня армування поліпропіленовим фіброволокном

Найкращі результати по міцності при стисканні (рисунок 3.15 та 3.16) показують зразки фібробетону з кількістю поліпропіленової фібри 8 кг/м^3.

Подальше збільшення армування поліпропіленових бетонів фіброю призводить до зниження їх міцності.

При дозуванні поліпропіленової фібри у кількості 14 кг/м^3 міцність зразків фібробетону знижується на 20 % в порівнянні з міцністю зразків з вмістом фібри в кількості 8 кг/м^3.

При вмісті фіброволокна 14 кг/м^3 спостерігалося комкування фібри та нерівномірний розподіл фіброволокон в об’ємі бетонної суміші, внаслідок чого погіршувалась формованість зразків.

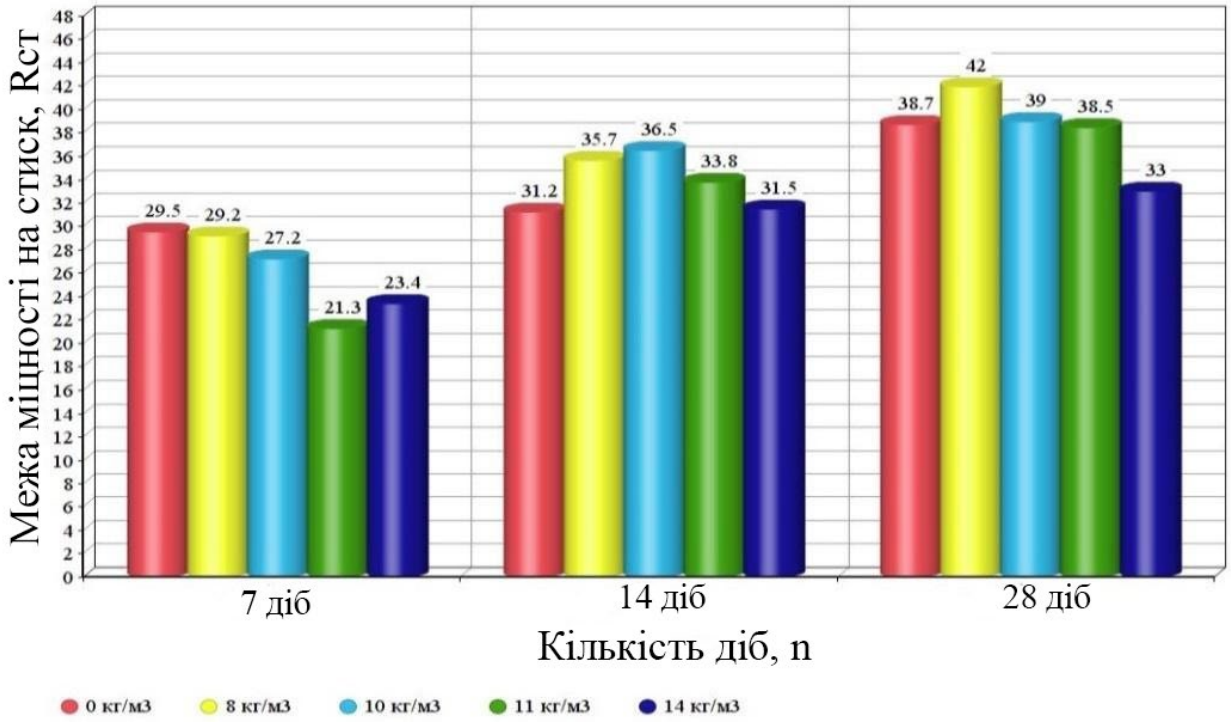

Рисунок 3.16 – Залежність міцності фібробетону на стиск від кількості поліпропіленової фібри.

Результати досліджень зразків на вигин з поліпропіленової фіброю представлені в таблиці 3.9 та на рисунках 3.17 та 3.18.

Таблиця 3.9 - Межі міцності на згинан зразків з поліпропіленової фіброю у віці 28 діб

Вік зразків	№ партії				
	8	9	10	11	2
	Кількість фібри, кг/м^3				
	0	8	10	11	14
	Межа міцності при вигині, МПа				
28 діб	5,8	5,5	5,9	6,2	5,0

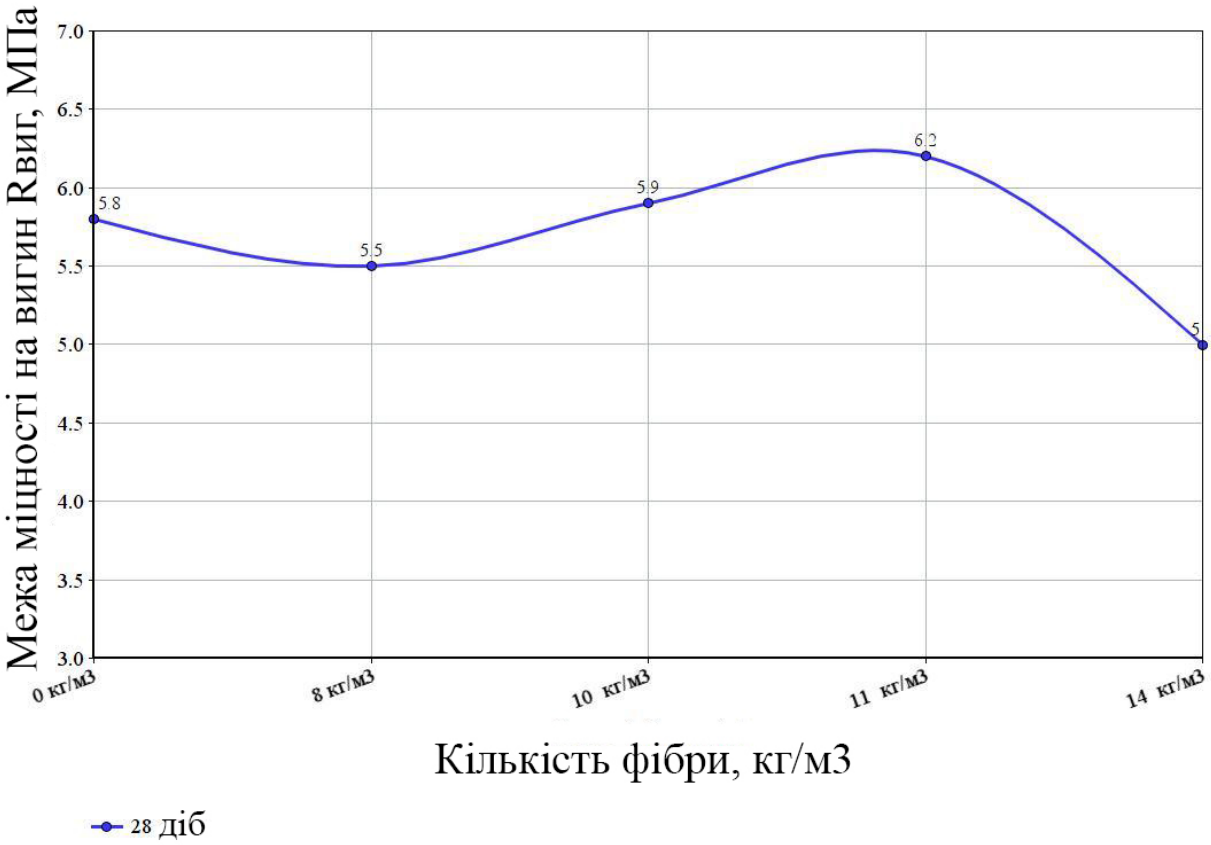

Рисунок 3.17 – Межа міцності фібробетону на вигин від ступеня армування поліпропіленовим фіброволокном

Крива міцності на вигин $R_{виг}$ (Рисунок 3.17) залежно від кількості фібри дещо відрізняється від кривої на стиск $R_{стис}$ (Рисунок 3.15). При згинанні найкращі результати показують зразки фібробетону з кількістю поліпропіленової фібри 11 кг/м^3. Подальше збільшення дозування поліпропіленового фіброволокна призводить до зниження рухливості сумішей та міцності (таблиця 3.7 та рисунок 3.17).

Найбільшу міцність при стиску показали зразки фібробетонів з кількістю фібри 8 кг/м^3, при згинанні – 11 кг/м^3. При порівнянні результатів досліджень межі міцності при згинанні (рисунок 3.17 та 3.18) видно, що при згинанні міцність зразків з кількістю фібри 11 кг/м^3 зросла на 12,7 % порівняно з межею міцності зразків, містять 8 кг/м^3 поліпропіленового фіброволокна.

Таким чином, оптимальною кількістю поліпропіленового фіброволокна є в межах від 8 кг/м^3 до 11 кг/м^3.

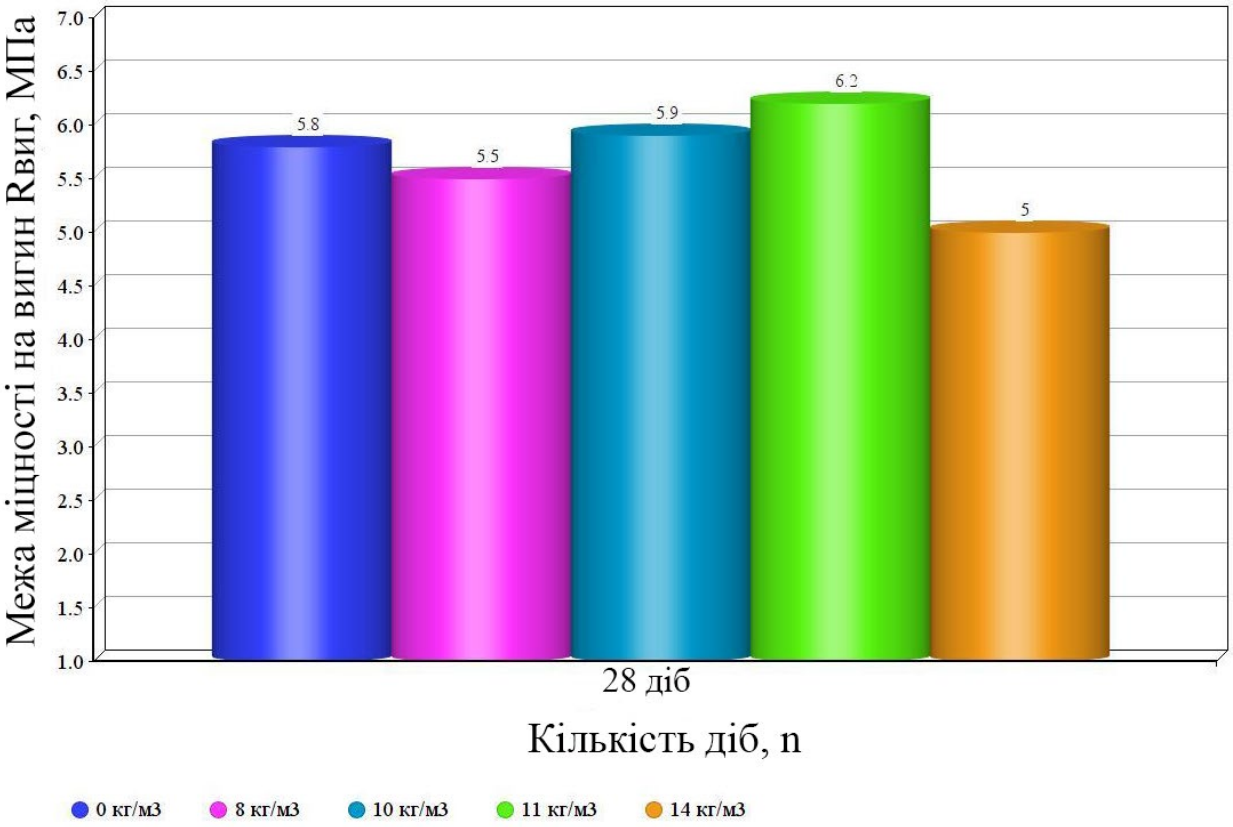

Рисунок 3.18 – Залежність міцності фібробетону на вигин у залежності від кількості поліпропіленової фібри

У ході порівняння результатів випробувань межі міцності на вигин (рис. 3.17 та 3.18) визначено, що використання поліпропіленового фіброволокна з відсотком армування 0,6% (14 кг/м^3) від маси бетонної суміші призводить до зниження міцності на вигин у порівнянні з контрольним зразком бетону. Отже, дисперсне армування даного складу поліпропіленовим фіброволокном у кількості понад 11 кг/м^3 недоцільно для конструкцій, що працюють на вигин.

На рисунку 3.19 зображено характер руйнування фібробетону з поліпропіленовим фіброволокном після випробування на згин.

Для вивчення впливу гіперпластифікатора на основі полікарбоксилатів на характеристики міцності фібробетонів з використанням як фібра поліпропіленового волокна була виготовлено серію зразків партій № 40 – 43.



Рисунок 3.19 – Зразок партії №2 після випробування на вигин

В експериментах серії IV партій № 40 – 43 в якості в'яжучого використовувався портландцемент ЦЕМ 42,5Н, як заповнювач – пісок Сухачівського родовища з модулем крупності Мкр. = 3,53, гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280» та мікрокремнезем.

Були виготовлені зразки зі складами: Ц : П = 1:1,43 при В : Ц = 0,45 і Ц : П = 1:2 при В : Ц = 0,5.

Склади фібробетонної суміші з поліпропіленовими волокнами наведено у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 - Склади фібробетонної суміші з поліпропіленовим волокном

Склад	№ партії			
	40	41	42	43
	Ц : П = 1 : 1,43		Ц : П = 1 : 2	
Одиниця виміру	кг/м^3			
Цемент CEM II/A-LL 42,5 R	578	560	490	475
Мікрокремнезем	248	241	211	205
Пісок «Сухачівський»	825	801	980	950
Вода	376	392	341	348
Фібра поліпропіленова	7	10	7	10
В/Ц	0,45	0,5	0,48	0,5
Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280»	7	7	6	6
Середня густина, кг/м^3	2041	2011	2035	1994
Розплив конуса, см	62	63	59	60

Результати досліджень зразків на стиск та вигин з поліпропіленовою фіброю та спеціальними наповнювачами представлені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 - Межа міцності при стисканні зразків з поліпропіленової фіброю

Склад	№ партії			
	40	41	42	43
	Кількість фібри, кг/м^3			
	7	10	7	10
	Межа міцності при стисканні, МПа			
7 діб	37	30,9	28,9	26,4
14 діб	45,1	37,6	37,3	35,9
28 діб	52,4	47,7	46,1	45,3
Межа міцності при згинанні, МПа				
28 діб	7,9	7,2	7,1	7,0

На рисунку 3.20 показані міцності зразків бетону на стиск у залежно від кількості поліпропіленової фібри в бетонній суміші складів Ц : П = 1:1,43 та 1:2,0.

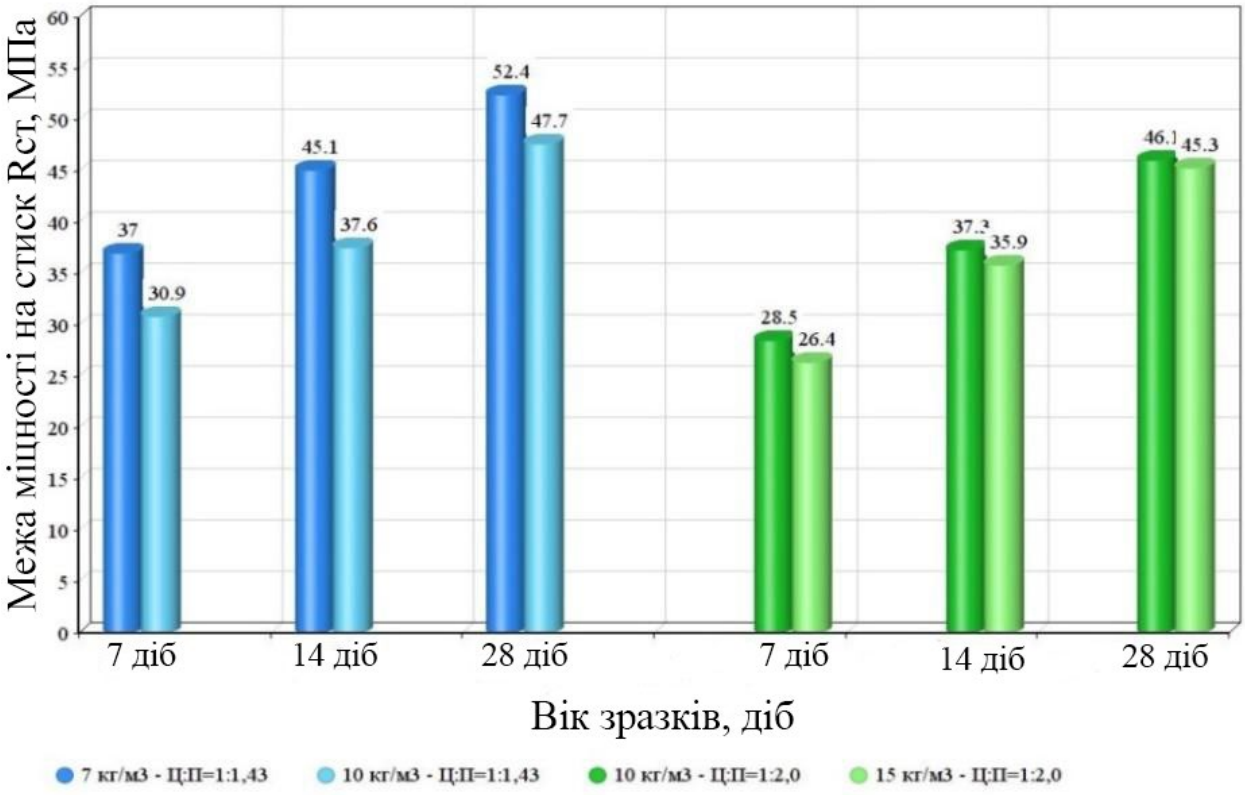

Рисунок 3.20 – Межа міцності фібробетону під час стиснення залежно від співвідношення компонентів бетонної суміші та ступеня армування поліпропіленовим фіброволокном

Дані таблиці 3.11 та рисунку 3.20 свідчать про те, що найбільше значення міцності при стиску в 28 діб (52,4 МПа) та згинанні (7,9 МПа) мають зразки бетону при вмісті фібри в суміші в кількості 7 кг/м^3 при співвідношенні Ц : П = 1: 1,43. Протягом 7 діб даний фібробетон (армування поліпропіленовою фіброю – 7 кг/м^3) набирає 71 % від марочної міцності у віці 28 діб, а фібробетон даного складу з армуванням у кількості 10кг/м^3 – 65 % від марочної міцності.

Зі зменшенням кількості цементу у складі фібробетонної суміші (Ц : П = 1:2) міцність бетону протягом 7 діб набирається повільніше - межах 58 % - 62% від міцності до 28 діб.

Використання при приготуванні фібробетону гіперпластифікатора «STACHEMENT 2280» та мікронаповнювача – мікрокремнезему скорочує витрати цементу на 24% (таблиця 3.10). Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280» відноситься до розряду «швидких» гіперпластифікаторів, оскільки має прискорюючий ефект і відповідно дає високі ранні міцності фібробетону. Цей гіперпластифікатор зменшує кількість води замішування, перешкоджає залученню зайвого повітря в бетон, підходить для армованих та попередньо напружених конструкцій, тому що не містить хлоридів.

Дані досліджень показують, що самоущільнюються дрібнозернисті фібробетони для монолітних конструкцій (класом не нижче В35) можуть бути виготовлені з доступних у регіоні матеріалів: цементу, природного піску, наповнювачів цементу, гіперпластифікаторів на основі полікарбоксилатів та металевого або пропіленового фіброволокно.

Даний фібробетон відрізняється підвищеною зручноукладальністю та технологічністю. При цьому властивості міцності отриманого фібробетону покращені введенням у нього наповнювача цементу – мікрокремнезему.

На рисунку 3.21 зображено зразок фібробетону після випробування на стиск з кількістю поліпропіленового фіброволокна 10 кг/м^3, наповнювачем та гіперпластифікатором.

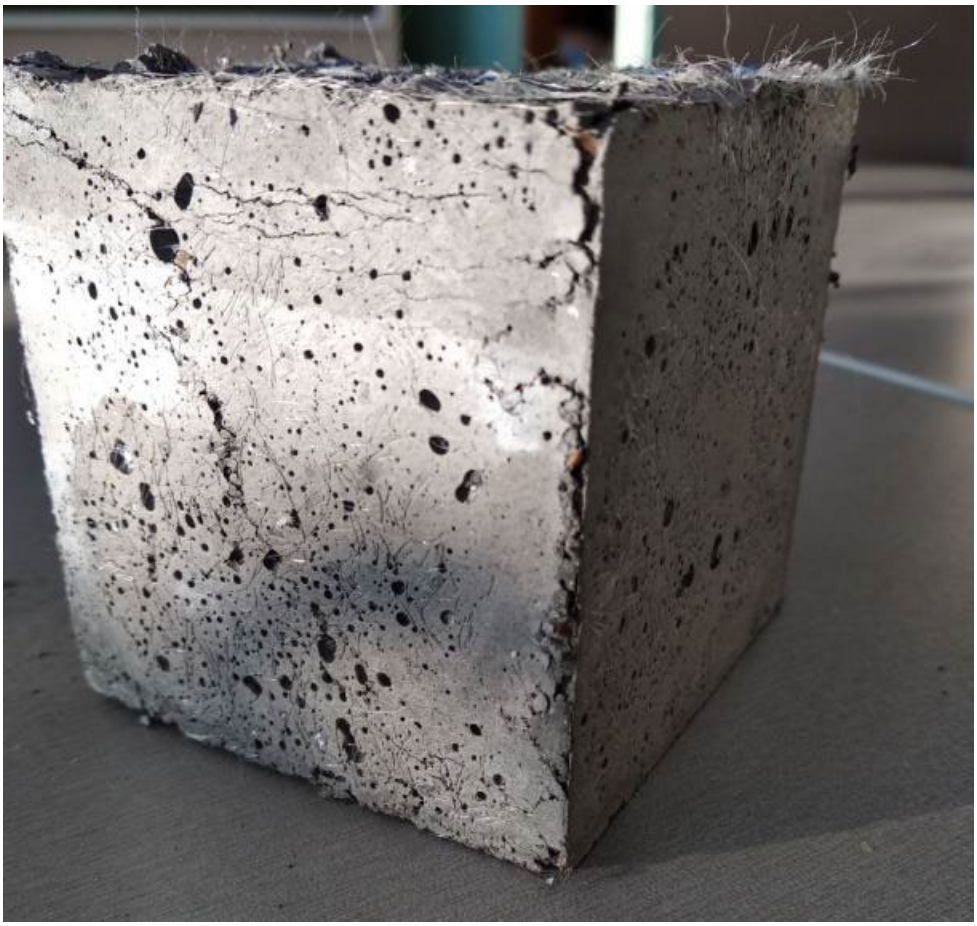

Рисунок 3.21 – Зразок партії № 43 після випробування на стиск

З рисунка 3.21 видно, що із збільшенням кількості поліпропіленового волокна при випробуванні зразків фібробетону на стиск помітно зменшується їхнє тріщиноутворення.

Ґрунтуючись на проведених нами раніше дослідженнях (серія III) були виготовлені зразки важких фібробетонів, дисперсно-армованих поліпропіленовим волокном серії V партій №45, 46, 47, 48. Склади важкої фібробетонної суміші наведено у таблиці 3.12.

Результати випробувань зразків важких фібробетонів дисперсноармованих поліпропіленовим волокном на стиск та вигин представлені в таблиці 3.13.

Таблиця 3.12 - Склади фібробетонної суміші з поліпропіленовим волокном

Склад	№ партії			
	40	41	42	43
Одиниця виміру	кг/м^3			
Цемент «Запорідбуддеталь» ПЦ І	698	699	699,5	691
Пісок «Балівський»	794	793	794	784
Щебінь 5-10 гранодіорити	437	436	437	432
Вода	313	314	315	311
Фібра поліпропіленова	-	3	5,5	9
В/Ц	0,45	0,45	0,45	0,45
Середня густина, кг/м^3	2242	2245	2251	2227
Осад конуса, см	6,0	5,5	5	4,5

Таблиця 3.13 – Межа міцності на стиск та згин зразків з поліпропіленовою фіброю

Склад	№ партії			
	45	46	47	48
	Кількість фібри, кг/м^3			
	0	3	5,5	9
	Межа міцності при стисканні, МПа			
7 діб	27,1	30,9	35,5	33,4
28 діб	40,0	47,7	48,4	44,9
Межа міцності при згинанні, МПа				
28 діб	6,3	7,1	7,3	6,7

На рисунках 3.22, 3.23 показані міцності зразків бетону на стиск в залежності від кількості поліпропіленової фібри у бетонній суміші.

Результати досліджень (рисунок 3.22 та 3.23) показують, що використання поліпропіленових волокон у важких фібробетонах кількості до 5,5 кг/м^3 збільшує міцність фібробетону на стиск на 17 % порівняно з фібробетоном без фібри на всіх стадіях твердіння фібробетону (7 та 28 діб). Отримано фібробетон класу В35. Подальше збільшення кількості фібри до 9 кг/м^3 призводить до зниження міцності як на стиск, так і на вигин.

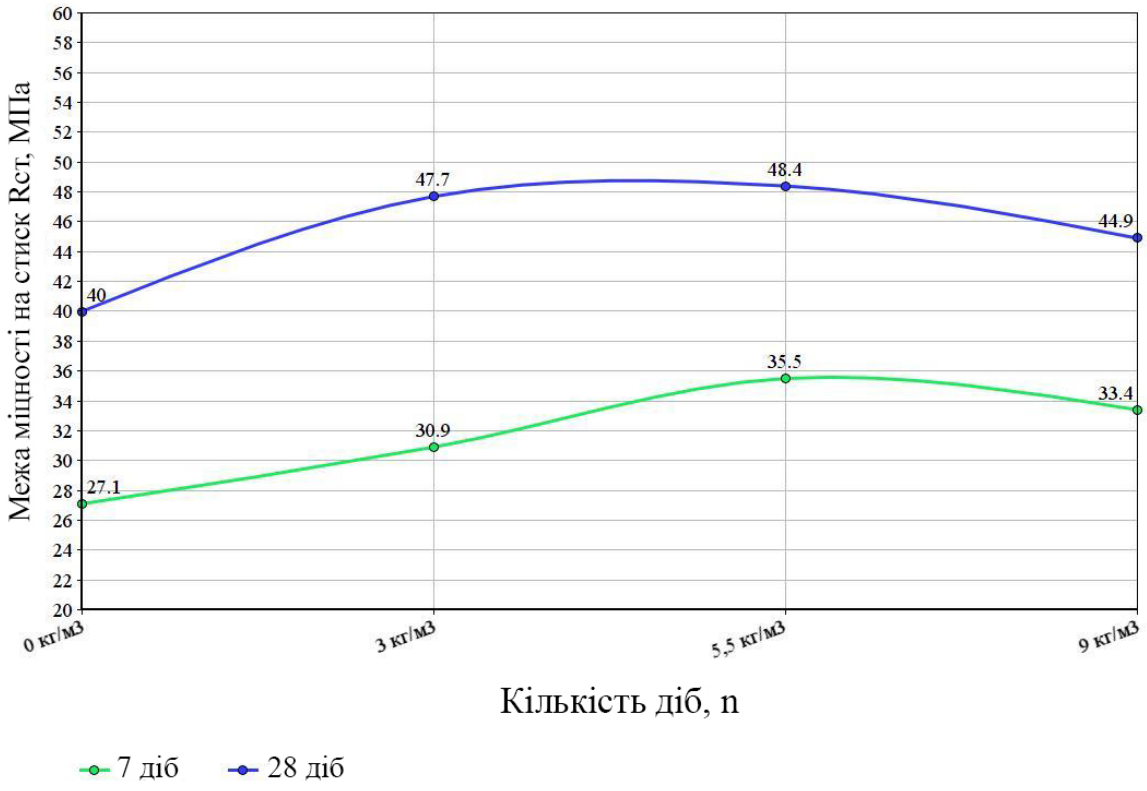

Рисунок 3.22 – Межа міцності важкого фібробетону при стисканні залежно від ступеня армування поліпропіленовим фіброволокном

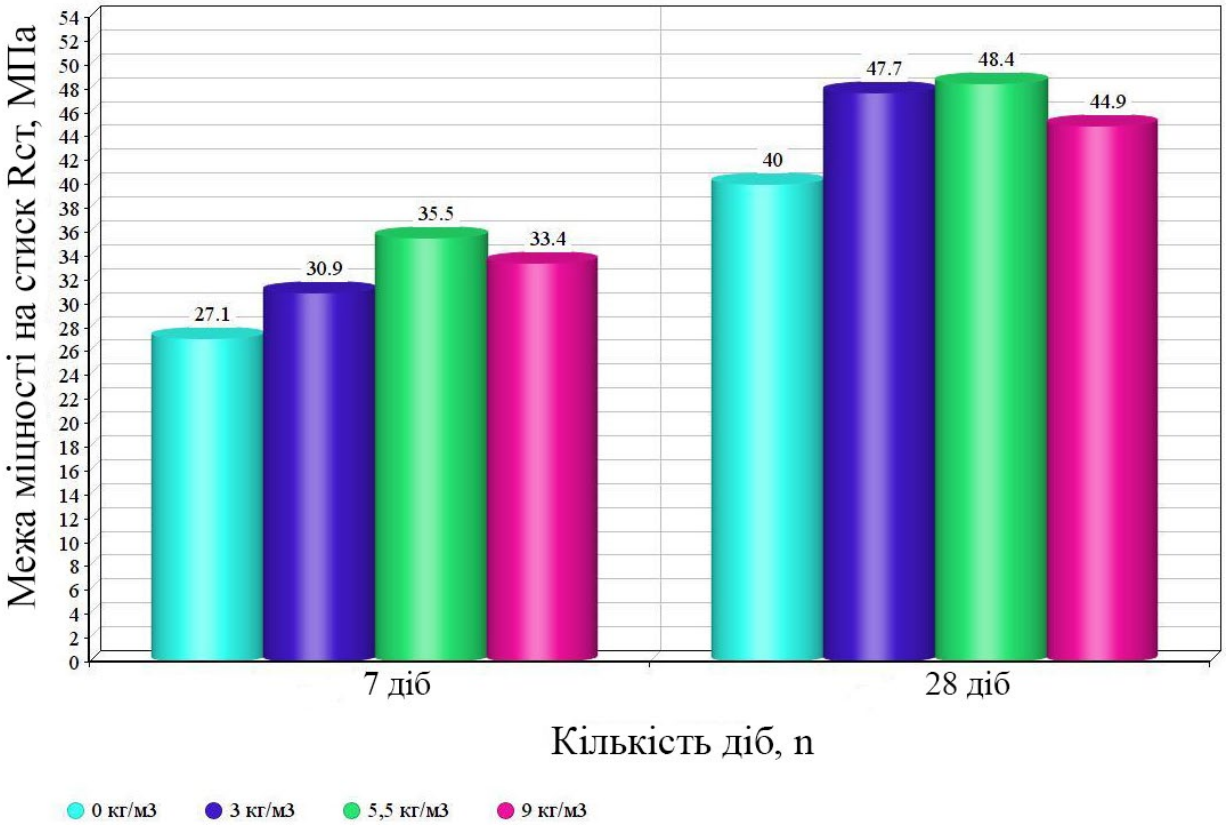

Рисунок 3.23 – Межа міцності важкого фібробетону на стиск залежно від ступеня армування поліпропіленовим фіброволокном

Результати випробувань зразків важких фібробетонів дисперсноармованих поліпропіленовим волокном на вигин представлені на рисунку 3.24.

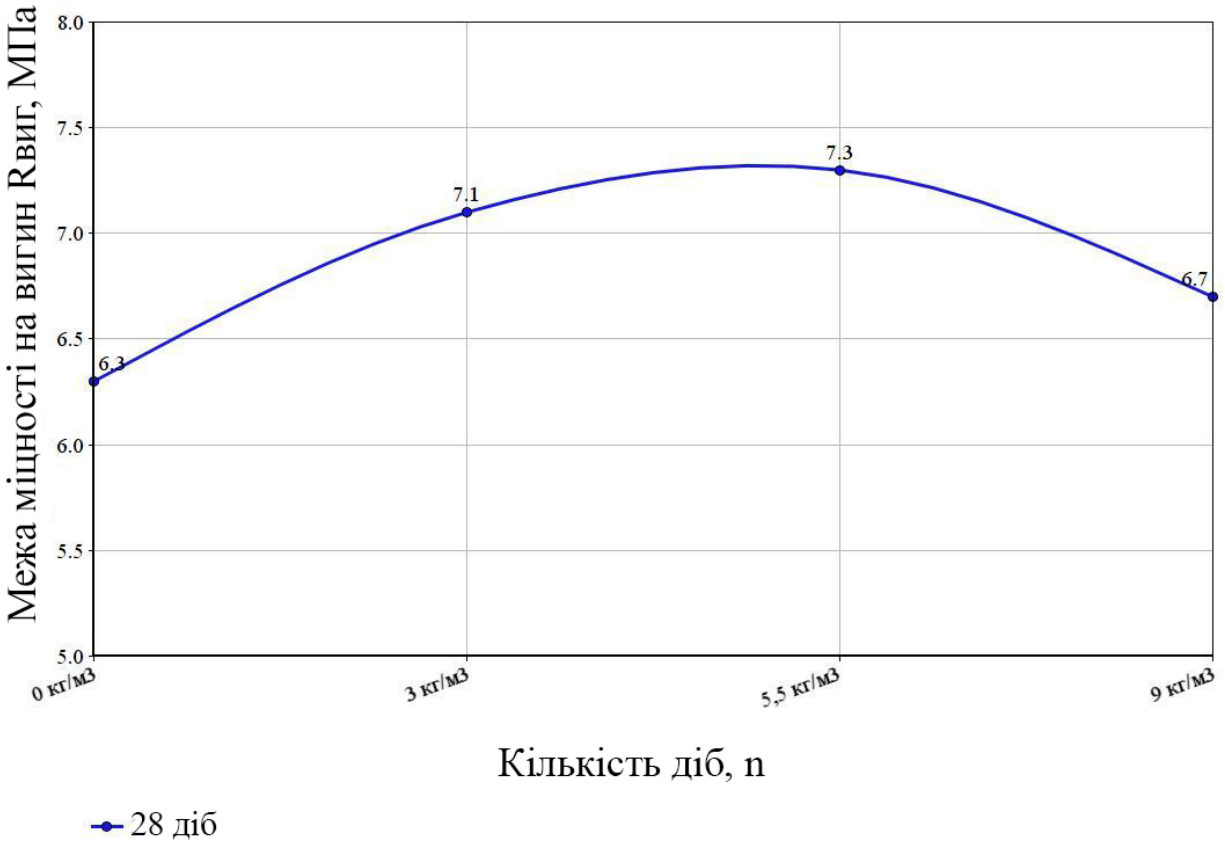

Рисунок 3.24 – Межа міцності важкого фібробетону на вигин залежно від ступеня армування поліпропіленовим фіброволокном

3.3 Дослідження властивостей фібробетону з використанням поліамідного фіброволокна

Як фіброволокно досліджувалися поліамідні волокна компанії-виробника «Budmat» (м. Київ).

Були виготовлені дрібнозернисті фібробетони, що самоущільнюються серії VI партії №12 зі складом Ц: П = 1:1,39 при В: Ц = 0,5 та №44 зі складом матриці: Ц: П = 1:2 при В: Ц = 0,48 з фіброволокном з поліамідними волокнами

компанії «Budmat».

Для виготовлення партії №12 були використані портландцемент «Запоріжбуддеталь» ПЦ І та природний пісок Балівського родовища з модулем крупності Мкр = 1,3, як фібра - поліамідні волокна.

Для виготовлення партії №44 були використані портландцемент ПрАТ Івано-Франківськцемент CEM II/A-LL 42,5 R, великий пісок Сухачівського родовища з модулем крупності Мкр = 3,5, мікрокремнезем, гіперпластифікатор "STACHEMENT 2280", у вигляді фібри - поліамідні волокна.

Поліамідне фіброволокно вводилося до складу бетонних сумішей кількості 7 кг/м^3 від ваги. Розплив фібробетонної суміші визначали шляхом вимірювання величини розпливу на струшуючому столику. Склади фібробетонної суміші з поліамідними волокнами наведено в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Склади фібробетонної суміші з поліамідними волокнами

Склад	№ партії	
	12	44
	Ц : П = 1 : 1,39	Ц : П = 1 : 2
Одиниця виміру	кг/м^3	
Цемент «Запоріжбуддеталь» ПЦ І	739	-
ПрАТ Івано-Франківськцемент CEM II/A-LL 42,5 R	-	513
Мікрокремнезем	-	221
Пісок «Балівський»	1027	-
Пісок «Сухачівський»	-	1026
Вода	370	354
Фібра поліамідні волокна	7	7
В/Ц	0,5	0,48
Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280»	-	7
Середня густина, кг/м^3	2143	2128
Розплив конуса, см	62	65

Технологія виготовлення фібробетонних зразків із поліамідними волокнами (партія №44) здійснювалася шляхом перемішування компонентів бетонної суміші в сухому вигляді, для рівномірного розподілу фіброволокна, після чого додавали воду з гіперпластифікатором і знову перемішували. У партію №44 мікрокремнезем вводився до складу суміші у кількості 30 % від маси цементу. Також у цю фібробетонну суміш додавався гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280» у кількості 1 % від маси цементу. Застосування гіперпластифікатора у складі бетонної суміші дозволяє поліпшити зручність фібробетону, отримати суміш з більшою рухливістю (партія №44).

Фібробетонна суміш вийшла досить рухлива з невеликим водовідділенням.

Поліамідні волокна набагато краще і легше перемішуються і рівномірно розподіляються у фібробетонній суміші, ніж поліпропіленове фіброволокно.

Результати досліджень зразків на стиск із поліамідним волокном представлені у таблиці 3.15 та рисунку 3.25.

Таблиця 3.15 – Результати випробувань зразків партій №12 та №44 на стиск та вигин

Вік зразків	№ партії	
	12	44
	Ц : П = 1 : 1,39	Ц : П = 1 : 2
	Кількість фібри, кг/м^3	
	7	7
	Межа міцності при стисканні, МПа	
7 діб	26,6	33,8
14 діб	34,2	43,2
28 діб	40,2	50,3
Межа міцності при згинанні, МПа		
28 діб	6	7,5

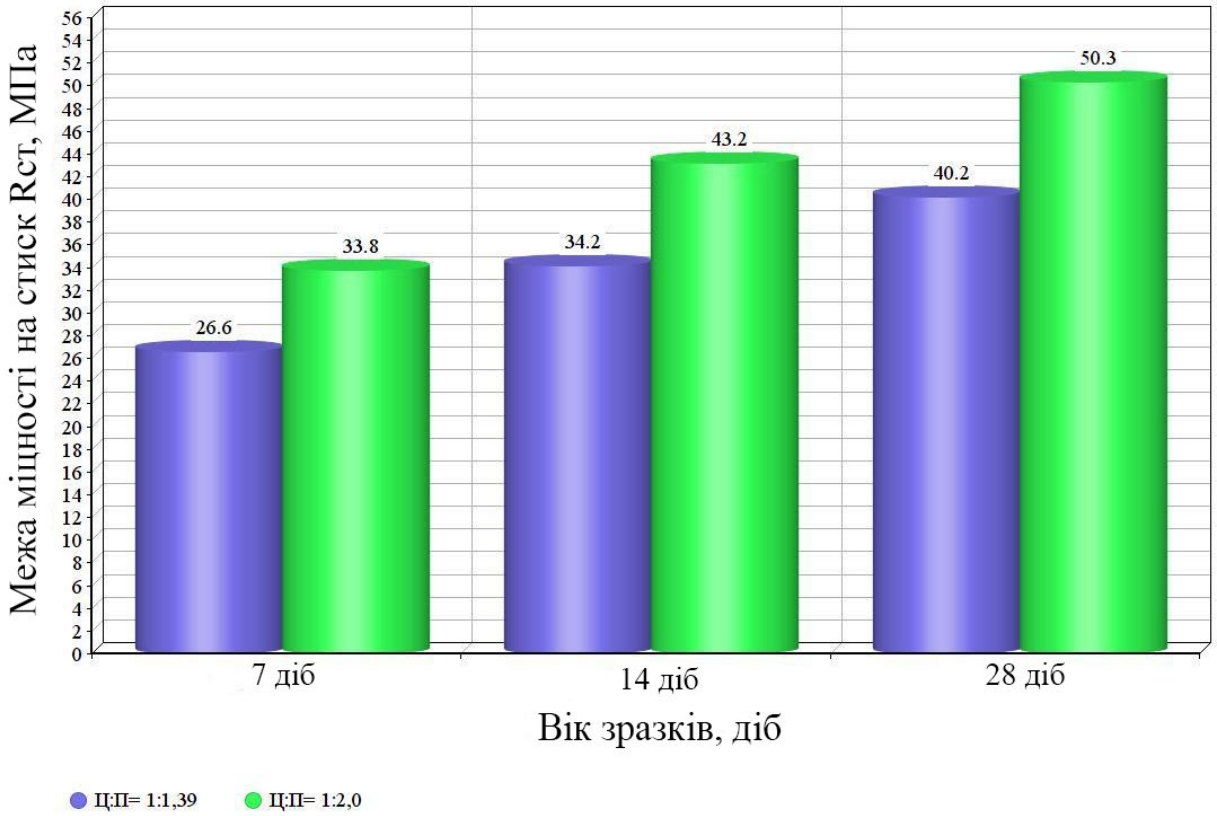

Рисунок 3.25 – Межа міцності фібробетону на стиск залежно від співвідношення компонентів бетонної суміші при однаковій кількості армування поліамідним волокном

За результатами експериментів міцність при стисканні фібробетону з використанням поліамідних волокон (партія №44) у 28 – добовому віці на 8,3% вище в порівнянні з міцністю фібробетону поліпропіленового волокна (партія №42). У семидобовому віці фібробетон на поліамідному волокні набирає міцність 70 % від марочної.

Використання в якості наповнювача цементу – мікрокремнезему позитивно позначилося на характеристиках міцності досліджуваного фібробетону.

Знизилася витрата цементу, в середньому на 20 % збільшилася міцність фібробетону (таблиця 3.15) та при стисканні та при вигині. Використання мікрокремнезему дозволяє отримати фібробетон з високими міцнісними характеристиками.

На рисунках 3.26 та 3.27 представлені зразки фібробетонів з поліамідними волокнами «Budmat» після випробування на стиск та вигин.

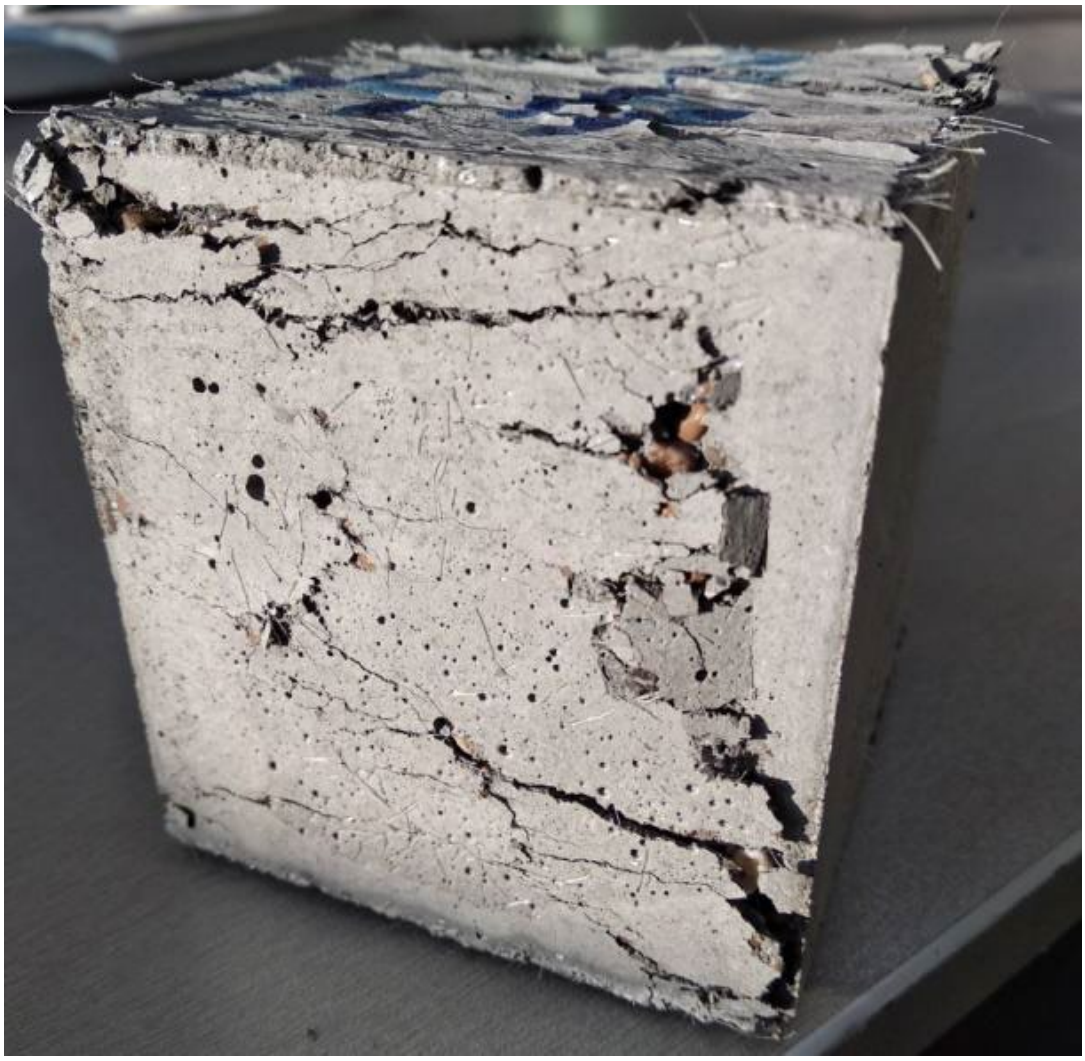

Рисунок 3.26 – Зразок куба з поліамідним волокном після випробування

Поліамідні волокна ефективно покращують робочі характеристики фібробетонів під навантаженнями, покращуючи опір фібробетону дії розтягуючих напружень та ударної дії, що відповідає пластичному характеру руйнування. За рахунок цього підвищується термін експлуатації та безпека використання виробів та конструкцій із даного фібробетону.

Порівнюючи з поліпропіленовою фіброю поліамідні волокна мають підвищену міцність на розрив і когезію з бетоном, це покращує контроль тріщиноутворення в середньому на 50 %.

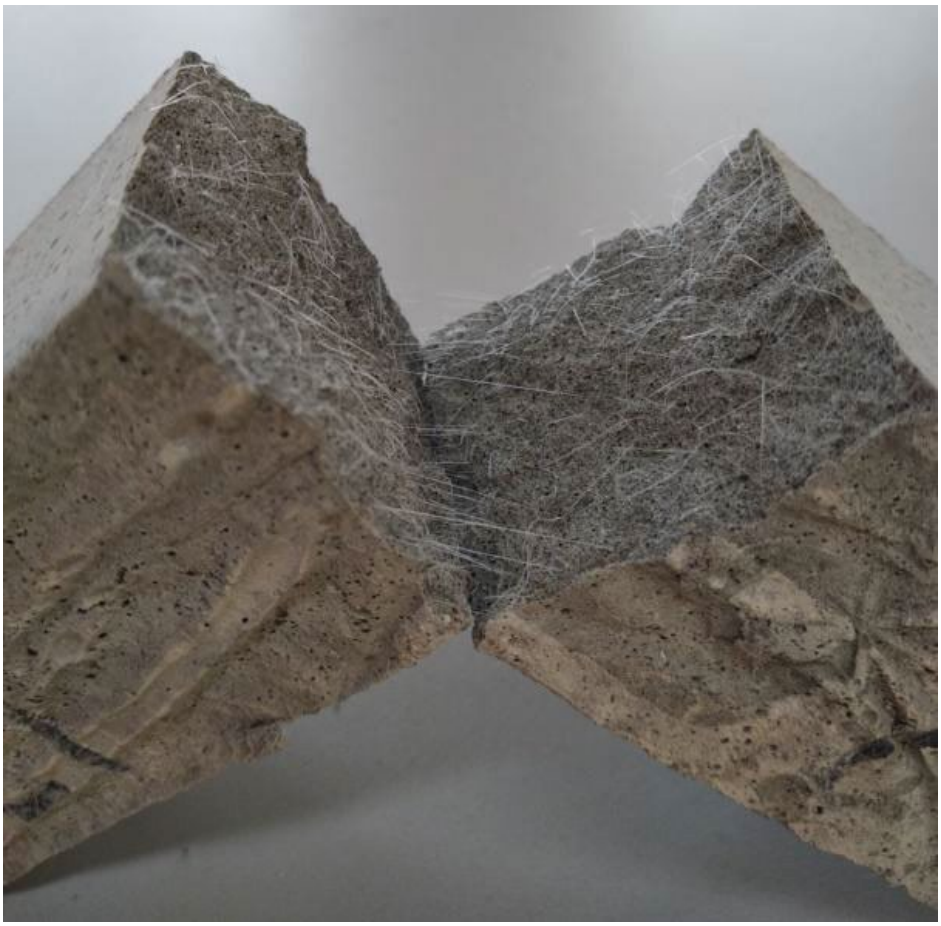

Рисунок 3.27 – Зразок партії №12 після випробування на вигин

3.4 Техніко – економічне обґрунтування використання фібробетону на основі металевої, поліпропіленової фібри та поліамідної фібри

В даний час будівництво ведеться із застосуванням способів і методів, за яких досягаються найбільш оптимальні техніко-економічні показники. Головна мета цих методів полягає в зниженні собівартості будівництва, спрощення технології виробництва та економії ресурсів.

У процесі експериментів було досліджено VI серій фібробетонів (48 партій), виготовлених з металевої, поліпропіленової фібри та поліамідної фібри.

Собівартість виробництва дрібнозернистого фібробетону з використанням мікрокремнезему та гіперпластифікатора, з оптимізованою

упаковкою заповнювача, що складається з вартості вихідних сировинних компонентів.

Вартість 1 м^3 фібробетонів (Ц : П = 1:2) II серії з металевою фіброю наповнювачем цементу та гіперпластифікатором представлені в таблиці 3.16, 3.17 та 3.18.

Таблиця 3.16 - Вартість матеріалів для приготування одного кубічного метра дрібнозернистого фібробетону партії №37 з металевою фіброю

Найменування матеріалу	Витрата на 1 м^3, т	Вартість без ПДВ, грн.	Вартість всього, грн.
Цемент ПЦ I «Запоріжбуддеталь»	0,501	6 500	3 256,5
Суханчівський пісок	1,002	650	651,3
Фібра хвильового профілю ФСВ-В-0,3/15	0,080	69 000	5 520
Вода	0,346	23,51	8,1
Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280»	0,007	146 200	1 023,4
Мікрокремнезем	0,216	9000	1 944
Вартість 1 м^3 фібробетону партії №37 серії II:			12 403,3

Таблиця 3.17 - Вартість матеріалів для приготування 1 м^3 дрібнозернистого фібробетону партії №38 з металевою фіброю

Найменування матеріалу	Витрата на 1 м^3, т	Вартість без ПДВ, грн.	Вартість всього, грн.
Портландцемент ПрАТ Івано-Франківськцемент CEM II/A-LL 42,5 R	0,499	6500	3243,5
Суханчівський пісок	0,998	650	648,7
Фібра хвильового профілю ФСВ-В-0,3/15	0,110	69000	7590
Вода	0,344	23,51	8,1
Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280»	0,006	146200	877,2
Мікрокремнезем	0,215	9000	1935
Вартість 1 м^3 фібробетону партії №38 серії II:			14302,5

Таблиця 3.18 - Вартість матеріалів для приготування 1 м^3 дрібнозернистого фібробетону партії №39 з металевою фіброю

Найменування матеріалу	Витрата на 1 м^3, т	Вартість без ПДВ, грн.	Вартість всього, грн.
Портландцемент ПрАТ Івано-Франківськцемент CEM II/A-LL 42,5 R	0,504	6500	3276
Суханчівський пісок	1,008	650	655,2
Фібра хвильового профілю ФСВ-В-0,3/15	0,146	69000	10074
Вода	0,448	23,51	10,5
Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280»	0,007	146200	1023,4
Мікрокремнезем	0,217	9000	1953
Вартість 1 м^3 фібробетону партії №39 серії II:			16992,1

Вартість 1 м^3 фібробетонів (Ц : П = 1:2), IV серії з поліпропіленовою фіброю, наповнювачем цементу та гіперпластифікатором представлена у таблицях 3.19 та 3.20.

Таблиця 3.19 - Вартість матеріалів для приготування 1 м^3 дрібнозернистого фібробетону партії №42 з поліпропіленовою фіброю

Найменування матеріалу	Витрата на 1 м^3, т	Вартість без ПДВ, грн.	Вартість всього, грн.
Портландцемент ПрАТ Івано-Франківськцемент CEM II/A-LL 42,5 R	0,490	6500	3185
Суханчівський пісок	0,980	650	637
Волокно поліпропіленове	0,007	268000	1876
Вода	0,341	23,51	8
Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280»	0,006	146200	877,2
Мікрокремнезем	0,211	9000	1899
Вартість 1 м^3 фібробетону партії №42 серії IV:			8482,2

Таблиця 3.20 - Вартість матеріалів для приготування 1 м^3 дрібнозернистого фібробетону партії №43 з поліпропіленовою фіброю

Найменування матеріалу	Витрата на 1 м^3, т	Вартість без ПДВ, грн.	Вартість всього, грн.
Портландцемент ПрАТ Івано-Франківськцемент CEM II/A-LL 42,5 R	0,513	6500	3334.5
Суханчівський пісок	1.026	650	667
Волокно поліпропіленове	0,007	120000	840
Вода	0,354	23,51	8.32
Гіперпластифікатор «STACHEMENT 2280»	0,007	146200	1023.4
Мікрокремнезем	0,221	9000	1989
Вартість 1 м^3 фібробетону партії №42 серії IV:			5875.2

Показники межі міцності та вартості зразків фібробетонів з наповнювачем цементу – мікрокремнеземом та гіперпластифікатором при співвідношенні Ц : П = 1:2 від кількості фібри представлені у таблиці 3.22.

Таблиця 3.22 – Показники межі міцності та вартості зразків фібробетонів з наповнювачем цементу та гіперпластифікатором при Ц : П = 1:2 від кількості фібри

№ партії	Кількість фібри, кг/м^3	Межа міцності, МПа		Вартість, грн.
		при стисканні $R_{стис}$	при згинанні $R_{згин}$	
Ц: П = 1:2				
Металева фібра				
37	80	46,8	7,3	12403,3
38	110	47,4	7,7	14302,5
39	146	50,1	7,9	16992,1
Поліпропіленова фібра				
42	7	46,1	7,1	8482,2
43	10	45,3	7,0	9115,4
Поліамідне волокно				
44	7	50,3	7,5	5875,2

З порівняльної таблиці собівартості фібробетонів серій II, IV та VI видно, що найбільш економічним є фібробетон із поліамідним волокном. За властивостями цей фібробетон не поступається, а навіть перевищує характеристики міцності зразків фібробетону з поліпропіленовим фіброволокном та згідно з розрахунками вартості є економічно ефективним, оскільки вартість на 35% нижча за вартість фібробетону на поліпропіленовому волокні цього складу.

Фібробетон із металевим фіброволокном має високі міцнісні характеристики та високу вартість у порівнянні зі звичайним бетоном. Незважаючи на високу вартість цього фібробетону, він має попит, за рахунок високих фізико-механічних властивостей і частіше всього використовується в будівництві для виготовлення фундаментів під обладнання та наливних підлог промислових будівель. Висока вартість даного фібробетону компенсується довговічністю матеріалу.

Як свідчать дані, можна отримати найвигідніші фібробетони з використанням відходів промислового виробництва рахунок зниження собівартості, не знижуючи при цьому міцнісні показники.

ВИСНОВКИ

З результатів проведених досліджень слідують такі висновки:

1. Проведено комплексне дослідження основних фізико-механічних властивостей дрібнозернистого фібробетону, що самоущільнюється, з використанням металевої, поліпропіленової фібри та поліамідної фібри. Отримано значення граничної міцності при стиску та вигину дрібнозернистих фібробетонів, що самоущільнюються в різному віці.

2. Проведено порівняння характеристик міцності фібробетонів, виготовлених з використанням металевої фібри, поліпропіленового та поліамідного волокна. Фібробетон з металевою фіброю має більше високі характеристики міцності в порівнянні з характеристиками фібробетону на поліпропіленовому фіброволокні (в середньому на 4…8%).

Експериментально встановлено, що міцність на стиск фібробетону з використанням поліамідних волокон у 28 – добовому віці на 8,3% вище в порівнянні з міцністю фібробетону з вмістом поліпропіленового волокна.

3. Отримано експериментальні залежності міцностних характеристик дрібнозернистих фібробетонів, що самоущільнюються залежно від віку. Фібробетон з металевою фіброю у 7 діб набирає міцність у середньому 70% від марочної.

Фібробетон складу Ц : П = 1:1,43 (армування поліпропіленовою) фіброю – 7 кг/м^3) протягом 7 діб набирає 71% від марочної міцності в віці 28 діб, а фібробетон даного складу з армуванням у кількості 10 кг/м^3 - 65% від марочної міцності. Зі зменшенням кількості цементу у складі фібробетонної суміші (Ц: П = 1:2) міцність фібробетону протягом 7 діб набирається повільніше – не більше 58% …62% від міцності у 28 діб.

Фібробетон на поліамідному волокні у віці 7 діб набирає міцність у середньому 70% від марочної.

4. Розроблено оптимальний склад дрібнозернистих фібробетонів, що

самоущільнюються, з використанням мікронаповнювача і гіперпластифікатора на основі полікарбоксилату, що дозволяє скоротити витрата цементу в середньому на 20% при одночасному покращенні фізико-механічних характеристик фібробетонів.

5. Експериментально встановлено, що самоущільнюючі дрібнозернисті фібробетони для монолітних конструкцій (класом не нижче В35) можуть бути виготовлені з доступних матеріалів: цементу, природного піску, мікронаповнювача цементу, гіперпластифікатора «STACHEMENT 2280» на основі полікарбоксилатів та металевого чи пропіленового фіброволокна. Даний фібробетон відрізняється підвищеною зручноукладальністю та технологічністю. При цьому властивості міцності отриманого фібробетону поліпшені введенням у нього мікронаповнювача цементу – мікрокремнезему.

6. Техніко – економічні розрахунки показують, що найбільше економічним є фібробетон з відходами виробництва – поліамідним волокном. За властивостями цей фібробетон не поступається, а навіть перевищує характеристики міцності зразків фібробетону з поліпропіленовим фіброволокном (в середньому на 5…8%) та згідно з розрахунками вартості є економічно ефективним, оскільки вартість матеріалів на 35% нижче вартості матеріалів фібробетону на поліпропіленовому волокні цього складу.

Фібробетон із металевим фіброволокном має високі міцнісні характеристики та високу вартість у порівнянні зі звичайним бетоном. Незважаючи на високу вартість цього фібробетону, він має попит, за рахунок високих фізико-механічних властивостей і частіше всього використовується в будівництві для виготовлення фундаментів під обладнання та наливних підлог промислових будівель. Висока вартість даного фібробетону компенсується довговічністю матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дворкін Л.Й., Бабич Є.М., Житковський В.В.,Бордюженко О.М., Кочкарьов Д.В., Філіпчук С.В., Ковалик І.В., Ковальчук Т.В., Скрипник М.М. В53 Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.

2. ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2015. Конструкції будинків і споруд. Дисперсноармовані залізобетонні конструкції. Настанова з проектування та виконання робіт. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 1994. 27 с.

3. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. [Чинний від 2017.04.01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2017. 32 с.

4. EN 14845-1, 2004 Test methods for fibres in concrete – Part 1: Reference concretes

5. EN 14845-2, 2006 Test methods for fibres in concrete - Part 2: Effect on concrete

6. EN 14845-1, 2006 Test methods for fibres in concrete – Part 1: Reference concretes

7. EN 14889-1:2007 Fiber for concrete - PART 1: Stel fibers - Definitions, Specification and conformity

8. EN 14889-2:2006 Fibres for concrete. - PART 2. Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity.

9. Fiber concrete technology. Brugg Contec AG Aachstr. 11 CH-8590 Romanshorn 2010. 22 page.

10. Steel fibre reinforced industrial floor design in accordance with the Concrete Society Technical Report (TR34). Bekaert. Belgia. 2000. 44p.

11. ДСТУ Б В.2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови. [Чинний від 2012-12-01]. Вид. офіц. Київ : НДІБМВ, 2011. 9 с.

12. ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельний матеріал. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови. [Чинний від 1995-10-31]. Вид. офіц. Київ : НДІБМВ, 1995. 35 с.

13. ДСТУ 9208:2022 Бетони важкі. Технічні умови. [Чинний від 2022-12-27]. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет стандартизації ТК 303 «Будівельні конструкції», 2022. 20 с.

14. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови

15. ДСТУ 9179:2022 Щебінь та гравій зі щільних гірських порід і металургійних шлаків для дорожнього будівництва. Методи фізико-механічних випробувань.

16. Рішення від 23.02.2006 № 10 Про проект Зміни № 1 ДСТУ Б В.2.7-43-96 «Бетони важкі. Технічні умови»,

17. ДСТУ Б В.2.7-96-2000 Суміші бетонні. Технічні умови.

18. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності.

19. ДСТУ Б В.2.7-221:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Класифікація і загальні технічні вимоги.

20. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.