Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

«Допустити до захисту»
зав. кафедри БДМБ
д-р техн. наук, професор
_____ В. Яцун
"____" _____ 2026 р.

Кваліфікаційна магістерська робота

на тему:

Оптимізація складів та оцінка техніко-економічної ефективності сталефібробетонів для виробництва збірних залізобетонних виробів

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи, доцент
_____ Скриннік І.О.
"____" _____ 2026 р.

Консультант з охорони праці, доцент
_____ Дарієнко В.В.
"____" _____ 2026 р.

Виконав студент гр. БІ-25 М
спеціальності
G19 Будівництво та цивільна інженерія
_____ Пальчиков В.Ю.
"____" _____ 2026 р.

Кропивницький – 2026 рік

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
ПАЛЬЧИКОВ ВЛАДИСЛАВ ЮРІЙОВИЧ
Сертифікат: 5E984D526F82F38F04000000FFE83602DF7EDF07
Дійсний з 15.08.2026 05:50:38 по 16.08.2027 02:59:59

Центральноукраїнський національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Інститут, факультет, відділення *ФБТЕ*
Кафедра, циклова комісія *Будівельні, дорожні машини і будівництво*
Освітньо-кваліфікаційний рівень *магістр*
Спеціальність *G19 Будівництво та цивільна інженерія*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри БДМБ,
д.т.н., проф. Яцун В.В.
_____
“____” _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Пальчикову Владиславу Юрійовичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) *Оптимізація складів та оцінка техніко-економічної ефективності сталефібробетонів для виробництва збірних залізобетонних виробів*

керівник проекту (роботи) *Скриннік І.О., _____, доцент*

(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *“10” 08 2026 року № 24-13*

2. Строк подання студентом проекту (роботи) *25.11.2027 р.*

3. Вихідні дані до проекту (роботи): *нормативна та довідкова література за темою; опубліковані результати досліджень складів і властивостей сталефібробетону; характеристики сталевої фібри; номенклатура і конструктивні рішення збірних залізобетонних виробів; розрахункові ціни матеріалів і праці.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Сучасний стан застосування сталефібробетону у збірному залізобетоні; 2. Оптимізація складів сталефібробетону; 3. Техніко-економічна оцінка ефективності сталефібробетону для збірних виробів; 4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу

Мультимедійна презентація (22 слайди), що ілюструє методику та результати досліджень

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	**Прізвище, ініціали та посада консультанта**	**Завдання видав (підпис, дата)**	**Завдання прийняв (підпис, дата)**
Розділи 1–3 (науково-дослідні)	доцент Скриннік І.О.		
Охорона праці	доцент Дарієнко В.В.		

7. Дата видачі завдання *01.09.2026 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	**Назва етапів проекту (роботи)**	**Строк виконання етапів**	**Примітка**
1	Огляд літератури, аналіз стану проблеми (розділ 1)	01.09–25.09	
2	Оптимізація складів сталефібробетону (розділ 2)	26.09–20.10	
3	Техніко-економічна оцінка (розділ 3)	21.10–05.11	
4	Розроблення заходів з охорони праці (розділ 4)	06.11–12.11	
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації	13.11–20.11	

Студент _____ Пальчиков В.Ю.

Керівник проекту (роботи) _____ Скриннік І.О.

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
				Документація загальна		
				Знову розроблена		
А4				Титульний аркуш	1	
А4				Завдання	2	
А4				Анотація	1	
А4				Abstract	1	
А4			ОСЗВ 20.G19.34 ПЗ	Пояснювальна записка	46	
				Зміст	2	
				Вступ	3	
				Розділ 1	10	
				Розділ 2	10	
				Розділ 3	9	
				Розділ 4. Охорона праці	5	
				Загальні висновки	2	
				General conclusions	2	
				Список використаних джерел	3	
А4			ОСЗВ 20.G19.34 ІМ	Ілюстраційні матеріали (мультимедійна презентація)	22	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ОСЗВ 20.G19.34 ВД		
Розробив		Пальчиков В.Ю.			Оптимізація складів і техніко-економічна ефективність сталефібробетонів для збірних виробів Відомість кваліфікаційної магістерської роботи	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Скриннік І.О.				М	1	1
Реценз.						ЦНТУ гр. БІ-25 М		
Н. контр.		Дарієнко В.В.						
Затвердив		Яцун В.В.						

АНОТАЦІЯ

Пальчиков В. Ю. Оптимізація складів та оцінка техніко-економічної ефективності сталефібробетонів для виробництва збірних залізобетонних виробів. – Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю G19 «Будівництво та цивільна інженерія». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026.

Роботу присвячено обґрунтуванню раціональних складів сталефібробетону для збірних залізобетонних виробів і оцінці техніко-економічної ефективності заміни стрижневого армування дисперсним. Проаналізовано властивості сталефібробетону, методи визначення залишкової міцності за EN 14651, класифікацію за fib Model Code 2010 і Додатком L Єврокоду 2, досвід застосування у збірних виробах і підходи до підбору складу. Запропоновано алгоритм оптимізації складу за мінімальною вартістю з обмеженнями за класом, технологічністю та статистичною забезпеченістю класу. Розраховано склади на основі матриці C30/37 і виконано прогнозування класу для трьох типів фібри; методом Монте-Карло оцінено ймовірність підтвердження класу під час виробничого контролю. Для плити лотка, кільця колодязя і сегмента тунелю виконано техніко-економічне порівняння варіантів армування, аналіз чутливості й оцінку ризику, визначено беззбиткову ціну фібри. Розроблено заходи з охорони праці під час виробництва виробів зі сталефібробетону.

Пояснювальна записка містить 46 сторінок, 17 рисунків, 13 таблиць, 25 джерел.

Ключові слова: СТАЛЕФІБРОБЕТОН, СТАЛЕВА ФІБРА, ЗАЛИШКОВА МІЦНІСТЬ, СКЛАД БЕТОНУ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ЗБІРНИЙ ЗАЛІЗОБЕТОН, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ОХОРОНА ПРАЦІ.

ABSTRACT

Palchykov V. Yu. Optimisation of mix designs and evaluation of the technical and economic efficiency of steel fibre reinforced concrete for the production of precast reinforced concrete products. – Master's qualification thesis, specialty G19 "Construction and Civil Engineering". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The thesis substantiates rational mix designs of steel fibre reinforced concrete (SFRC) for precast products and evaluates the efficiency of replacing conventional reinforcement with fibres. The properties of SFRC, residual flexural strength testing according to EN 14651, classification according to the fib Model Code 2010 and Annex L of Eurocode 2, precast applications and mix design approaches are analysed. An optimisation algorithm minimising cost subject to the residual strength class, workability and statistical reliability of the class is proposed. Mixes based on a C30/37 matrix were designed and the class was predicted for three fibre types; Monte Carlo simulation was used to estimate the probability of class conformity. For a channel cover slab, a manhole ring and a tunnel segment, the reinforcement options were compared, sensitivity and risk analyses were performed and the break-even fibre price was determined. Occupational safety measures for SFRC production are developed.

The explanatory note contains 46 pages, 17 figures, 13 tables and 25 references.

Keywords: STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE, STEEL FIBRE, RESIDUAL STRENGTH, MIX DESIGN, OPTIMISATION, PRECAST CONCRETE, COST EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ВСТУП 3
Розділ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ЗАСТОСУВАННЯ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ У ЗБІРНОМУ ЗАЛІЗОБЕТОНІ 6
1.1 Сталефібробетон як конструкційний матеріал 6
1.2 Види сталевої фібри та механізм її роботи 8
1.3 Методи визначення характеристик і класифікація сталефібробетону 9
1.4 Застосування сталефібробетону у збірних виробах 11
1.5 Підходи до підбору складу сталефібробетону 13
1.6 Висновки до розділу 1 і завдання досліджень 14
Розділ 2 ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ ДЛЯ ЗБІРНИХ ВИРОБІВ 16
2.1 Постановка задачі оптимізації 16
2.2 Параметри армування фіброю 17
2.3 Розрахунок складів методом абсолютних об'ємів 19
2.4 Прогнозування залишкової міцності 21
2.5 Вибір типу і витрати фібри для заданого класу 22
2.6 Статистичне забезпечення класу методом Монте-Карло 23
2.7 Висновки до розділу 2 25
Розділ 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ ДЛЯ ЗБІРНИХ ВИРОБІВ 26
3.1 Методика оцінки 26
3.2 Розрахунок плити перекриття лотка 27
3.3 Порівняння вартості для трьох виробів 29
3.4 Аналіз чутливості й беззбиткова ціна 31
3.5 Оцінка ризику методом Монте-Карло 32
3.6 Рекомендації щодо впровадження на заводі ЗБВ 33

					ОСЗВ 20.G19.34 ПЗ		
Змн.	*Арк.*	*№ докум.*	*Підпис*	*Дата*			
Розробив		*Пальчиков В.Ю.*			*Оптимізація складів і техніко-економічна ефективність сталефібробетонів для збірних виробів*	*Літ.*	*Арк.*	*Аркушів*
Перевірив		*Скриннік І.О.*				*М*	*1*	*46*
Реценз.						*ЦНТУ гр. БІ-25 М*		
Н. контр.		*Дарієнко В.В.*						
Затвердив		*Яцун В.В.*						

3.7 Висновки до розділу 3 34
Розділ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ 35
4.1 Особливості умов праці під час виробництва виробів зі сталефібробетону 35
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів..... 35
4.3 Оцінка рівня шуму на робочому місці формувальника 36
4.4 Розрахунок повітрообміну в дозувальному відділенні 37
4.5 Електробезпека..... 38
4.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях 38
4.7 Висновки до розділу 4 39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 40
GENERAL CONCLUSIONS 42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 44

ВСТУП

Актуальність теми. Заводи збірного залізобетону в Україні працюють в умовах, коли водночас зростають обсяги відновлення інфраструктури, вимоги до швидкості виготовлення виробів і вартість ручної праці. Найбільш трудомісткою операцією у виробництві багатьох збірних виробів залишається виготовлення та встановлення арматурних каркасів і сіток: різання, гнуття, в'язання або зварювання, фіксація захисного шару. Для тонкостінних виробів складної форми (кілець колодязів, труб, лотків, сегментів оброблення тунелів) ця операція визначає ритм технологічної лінії.

Сталефібробетон (СФБ) – бетон, дисперсно армований короткими сталевими волокнами, – дозволяє частково або повністю замінити стрижневе армування в таких виробах. Волокна вводяться в бетонну суміш під час перемішування, а отже, операції з каркасом зникають або спрощуються. Світовий досвід свідчить, що фібра найбільше підвищує міцність на розтяг при згині, ударну стійкість і в'язкість руйнування, тоді як міцність на стиск змінюється несуттєво [1]. Збірні сегменти оброблення тунелів, труби, плити та кільця з СФБ уже є серійною продукцією в багатьох країнах [2, 3, 4].

Водночас сталева фібра – дорогий компонент, і її витрата 20–60 кг/м³ може збільшити вартість матеріалів у півтора-два рази. Тому застосування СФБ на конкретному заводі має бути обґрунтоване двома взаємопов'язаними рішеннями: складом бетону (тип і витрата фібри, параметри матриці), що забезпечує потрібний клас за залишковою міцністю, і техніко-економічним порівнянням із традиційним армуванням з урахуванням праці. Нормативна база для цього в Україні формується: після введення в Європі EN 1992-1-1:2023 з Додатком L проєктування конструкцій із фібробетоном отримало загальноєвропейську основу [5], яку доцільно адаптувати до практики вітчизняних підприємств.

Отже, розроблення методики оптимізації складів сталефібробетону і оцінки техніко-економічної ефективності його застосування для збірних залізобетонних виробів є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи – обґрунтувати раціональні склади сталефібробетону для збірних залізобетонних виробів і оцінити техніко-економічну ефективність заміни стрижневого армування дисперсним.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

– проаналізувати сучасний стан застосування сталефібробетону, методи визначення його характеристик і класифікацію за fib Model Code 2010 і Додатком L Єврокоду 2;

– узагальнити підходи до підбору складу сталефібробетону і встановити діапазони основних параметрів суміші;

– розробити алгоритм оптимізації складу СФБ за критерієм мінімальної вартості з обмеженнями за класом залишкової міцності, технологічністю і статистичною забезпеченістю класу;

– розрахувати склади СФБ методом абсолютних об'ємів і виконати прогнозування їхньої залишкової міцності для трьох типів фібри;

– виконати техніко-економічне порівняння варіантів армування для трьох характерних збірних виробів, аналіз чутливості та оцінку ризику методом Монте-Карло;

– розробити заходи з охорони праці під час виробництва виробів зі сталефібробетону.

Об'єкт дослідження – процес проєктування складів і виробництва збірних залізобетонних виробів зі сталефібробетону.

Предмет дослідження – залежність залишкової міцності на розтяг при згині, класу сталефібробетону та вартості виробів від типу й витрати сталевої фібри та способу армування.

Методи дослідження. Аналіз і узагальнення науково-технічної літератури та нормативних документів; метод абсолютних об'ємів для розрахунку складу бетонної суміші; регресійні моделі залишкової міцності, що спираються на індекс армування; розрахунок за граничними станами з жорстко-пластичною моделлю роботи розтягнутого СФБ; статистичне моделювання методом Монте-Карло; аналіз чутливості; розрахунки виконано мовою Python.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

– запропоновано алгоритм вибору складу сталефібробетону, у якому, крім умов за класом залишкової міцності, враховано технологічне обмеження за індексом армування і ймовірність підтвердження класу під час виробничого контролю;

– методом Монте-Карло показано, що за шести зразків у серії і коефіцієнті варіації 20 % для підтвердження класу 4с з імовірністю 0,95 потрібна витрата фібри, значно більша за отриману з детерміністичного розрахунку, і що зниження розкиду до 15 % є дієвішим резервом економії фібри, ніж збільшення її витрати;

– для трьох характерних збірних виробів встановлено беззбиткову ціну сталевої фібри залежно від вартості праці і показано, що ефективність СФБ визначається насамперед відношенням трудомісткості арматурних робіт до витрати фібри.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розроблених складах СФБ на основі однієї бетонної матриці для різних класів залишкової міцності, у методиці техніко-економічного порівняння варіантів армування, яку можна застосувати на заводі ЗБВ для власних цін і норм праці, та в рекомендаціях щодо поетапного впровадження фібробетону.

Апробація результатів. Основні результати роботи представлено на міжнародній науково-технічній онлайн-конференції «Наука, інженерія та технології: сучасні виклики й перспективи» (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 24–25 листопада 2026 р.).

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків українською та англійською мовами і списку використаних джерел. Загальний обсяг – 46 сторінок, у тому числі 17 рисунків, 13 таблиць; список використаних джерел містить 25 найменувань.

Розділ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ЗАСТОСУВАННЯ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ У ЗБІРНОМУ ЗАЛІЗОБЕТОНІ

1.1 Сталефібробетон як конструкційний матеріал

Сталефібробетон – композиційний матеріал, у якому бетонна матриця дисперсно армована короткими сталевими волокнами, розподіленими по об'єму хаотично. На відміну від стрижневої арматури, що розміщується лише в розтягнутій зоні перерізу, фібра присутня в усьому об'ємі елемента. Вона не перешкоджає утворенню першої тріщини, однак після її появи волокна, що перетинають тріщину, передають зусилля через її береги за рахунок зчеплення й анкерування. Саме ця післятріщинна робота, а не підвищення міцності матриці, є головною властивістю СФБ.

Огляд Vijayan та ін. [1], що узагальнює понад сто досліджень, показує однозначну ієрархію впливу фібри на властивості бетону. Найбільше зростає міцність на розтяг при згині та енергія руйнування; помірно – міцність на розтяг при розколюванні; найменше – міцність на стиск, приріст якої за звичайних дозувань коливається в межах похибки випробувань, а за об'ємного вмісту понад 2 % може навіть зменшуватися через погіршення ущільнення. Особливо великий ефект спостерігається за ударних навантажень: високоміцний СФБ за даними наведеного в огляді дослідження витримував у 3,9 раза більшу енергію до появи першої тріщини і в 4,2 раза більшу до руйнування, ніж високоміцний бетон без фібри [1].

Регресійний аналіз 60 результатів випробувань, виконаний Thomas і Ramaswamy [6], підтвердив, що зростання характеристик СФБ визначається взаємодією волокон із матрицею і описується через індекс армування

$$RI = V_f \cdot l_f / d_f, \qquad (1.1)$$

де V_f – об'ємний вміст фібри (частка); l_f – довжина волокна, мм; d_f – еквівалентний діаметр волокна, мм.

Автори показали, що закон суміші, за яким внесок фібри пропорційний лише її об'ємові, недооцінює ефект: важить і міцність самої матриці, оскільки

від неї залежить зчеплення волокна [6]. Подібні аналітичні моделі розроблено й для інших типів матриць; їх зіставлення наведено, зокрема, в [7].

Основні переваги та обмеження СФБ, важливі для заводського виробництва, узагальнено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Переваги та обмеження сталефібробетону для збірних виробів (узагальнено автором за [1, 2, 4])

Ознака	Переваги	Обмеження
Технологія армування	немає операцій із каркасом; фібра вводиться в змішувач	потрібне дозування фібри без утворення грудок («їжаків»)
Робота під навантаженням	рівномірний опір розтягу в усьому об'ємі, контроль ширини тріщин	без арматури – обмежена несуча здатність за великих моментів
Ударні та монтажні впливи	висока стійкість до відколів кромок під час розпалублення, транспортування, монтажу	–
Довговічність	менша ширина тріщин; немає зони вздовж стрижнів, де концентрується корозія	поверхнева корозія волокон біля граней (естетичний дефект)
Контроль якості	випробування стандартних балочок за EN 14651	більший розкид залишкової міцності, ніж міцності на стиск
Вартість	економія праці й часу формування	висока ціна фібри, додатковий суперпластифікатор

Для збірного залізобетону вирішальними є перша й остання ознаки: на заводі вартість праці і тривалість циклу формування безпосередньо впливають на собівартість, тому економічний ефект СФБ слід оцінювати не за вартістю матеріалів, а за повною вартістю армування виробу. Ця теза перевіряється в розділі 3.

Вітчизняні дослідження СФБ зосереджені переважно на роботі балкових і плитних елементів. В Одеській державній академії будівництва та архітектури досліджено тріщиностійкість, деформативність і несучу здатність фібробетонних і комбіновано армованих балок за короткочасного й тривалого навантаження [8], а також динамічні характеристики сталефібробетонних балок і плит. Питання матеріалів і конструкцій спеціального призначення, зокрема з дисперсним армуванням, висвітлюються у збірниках Київського національного університету будівництва і архітектури [9]. Однак методичних розробок, які

пов'язували б підбір складу СФБ з економікою конкретного заводського виробу, у вітчизняній літературі небагато.

1.2 Види сталевої фібри та механізм її роботи

Вимоги до сталевої фібри для бетону встановлює EN 14889-1 [10]. Стандарт поділяє фібру на групи за способом виготовлення: холоднотягнутий дріт (група I), різаний лист (II), фрезерована зі злитків (III), сформована з холоднотягнутого дроту зі зміною форми (IV) і стружка (V). Виробник декларує довжину, еквівалентний діаметр, форму, міцність на розтяг і, що важливо, мінімальну витрату, за якої фібра в стандартному бетоні забезпечує залишкову міцність не менше 1,5 МПа за ширини розкриття тріщини 0,5 мм і не менше 1 МПа – за 3,5 мм.

Характерні форми волокон наведено на рис. 1.1. Пряма гладка фібра має найменше зчеплення і висмикується з матриці за малого розкриття тріщини. Найпоширенішою для конструкційного застосування є фібра з загнутими кінцями (анкерами): анкер деформується під час висмикування і забезпечує значний опір до розкриття тріщини 1–3 мм. Фібра з подвійними і потрійними загинами має підвищене анкерування і використовується з високоміцними матрицями; хвиляста і фібра з розплющеними кінцями застосовуються рідше.

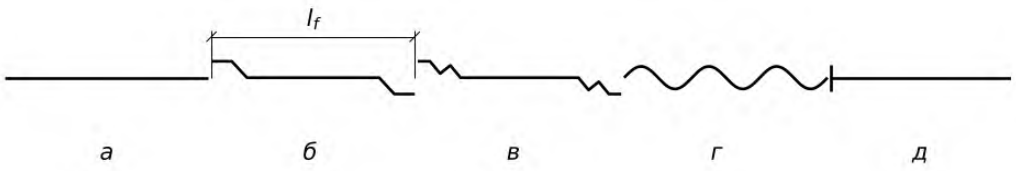

Рис. 1.1 Основні форми сталевої фібри: а – пряма; б – з анкерами на кінцях; в – з багаторазовими загинами анкерів; г – хвиляста; д – з розплющеними кінцями (складено автором)

Venkateshwaran, Tan і Li [11] за результатами випробувань балочок із фібрами з різною кількістю загинів анкерів встановили, що залишкова міцність на розтяг при згині пропорційна індексу армування, кореню квадратному з міцності бетону на стиск і зростає зі збільшенням кількості загинів. За витрати понад 20 кг/м³ багатоанкерна фібра забезпечувала зміцнення після утворення

тріщини (deflection hardening) [11]. Ця структура залежності покладена в основу прогнозної моделі розділу 2.

Для роботи в бетоні важать три геометричні параметри: довжина, що має бути не меншою ніж у 2–3 рази за найбільший розмір зерна заповнювача, щоб волокно перетинало тріщину по обидва боки зерна; відношення довжини до діаметра l/d, що визначає ефективність волокна за однакової маси; діаметр, від якого залежить кількість волокон в одиниці об'єму. Характеристики трьох типів фібри, розглянутих у роботі, наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Характеристики фібри з анкерами, прийнятих для розрахунків

Позначення	**l_f, мм**	**d_f, мм**	**l/d**	**Міцність дроту, МПа**	**Характерне призначення**
35/0,55	35	0,55	64	≥ 1100	тонкостінні вироби, торкрет-бетон
60/0,75	60	0,75	80	≥ 1100	плити, сегменти, промислові підлоги
50/1,0	50	1,00	50	≥ 1000	масивні елементи, підлоги з невисокими вимогами

1.3 Методи визначення характеристик і класифікація сталефібробетону

Основною розрахунковою характеристикою СФБ є залишкова міцність на розтяг при згині, яку визначають за EN 14651 [12]. Призму перерізом 150×150 мм і довжиною 550 мм з надрізом посередині прольоту глибиною 25 мм випробовують на триточковий згин із прольотом 500 мм (рис. 1.2). Під час випробування записують залежність навантаження від ширини розкриття надрізу CMOD.



Рис. 1.2 Схема випробування призми на триточковий згин за EN 14651 (складено автором за [12])

За діаграмою «навантаження – CMOD» (рис. 1.3) визначають межу пропорційності f_L (за найбільшим навантаженням на ділянці CMOD до 0,05 мм) і залишкові міцності $f_{R,j}$ за CMOD = 0,5; 1,5; 2,5 і 3,5 мм:

$$f_{R,j} = 3 F_j l / (2 b h_{sp}^2), \quad (1.2)$$

де F_j – навантаження за $CMOD_j$, Н; l = 500 мм – проліт; b = 150 мм – ширина призми; h_{sp} = 125 мм – відстань від вершини надрізу до верхньої грані.

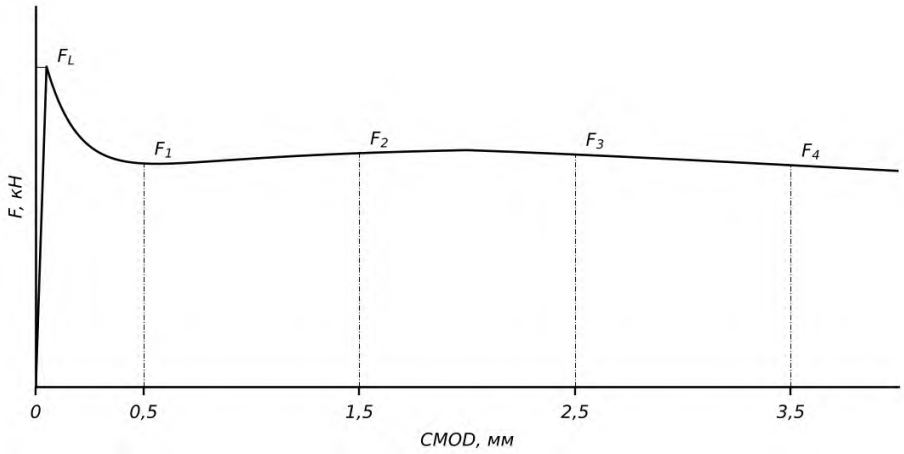

Рис. 1.3 Характерна діаграма «навантаження – CMOD» сталефібробетону і точки визначення залишкової міцності (складено автором за [12])

Значення f_{R1} характеризує роботу СФБ за експлуатаційних навантажень (вузька тріщина), f_{R3} – за граничного стану (широка тріщина). У fib Model Code 2010 [13] на цій основі введено класифікацію: клас позначається числом, що дорівнює характеристичному значенню f_{R1k} (ряд 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0;

6,0; 7,0; 8,0 МПа), і літерою, що визначається відношенням f_{R3k}/f_{R1k}: a – від 0,5 до 0,7; b – від 0,7 до 0,9; c – від 0,9 до 1,1; d – від 1,1 до 1,3; e – понад 1,3. Наприклад, клас 4c означає $f_{R1k} \geq 4{,}0$ МПа і $f_{R3k} \geq 0{,}9 \cdot 4{,}0 = 3{,}6$ МПа. Фібробетон може замінювати стрижневу арматуру в граничному стані, якщо виконуються умови $f_{R1k}/f_{Lk} > 0{,}4$ і $f_{R3k}/f_{R1k} > 0{,}5$ [13].

Для розрахунку перерізу за граничними станами від залишкових міцностей переходять до міцності СФБ на осьовий розтяг. Найпростішою є жорстко-пластична модель, за якою розрахункова гранична міцність на розтяг

$$f_{Ftu} = f_{R3} / 3, \tag{1.3}$$

де коефіцієнт 1/3 отримано з умови рівноваги перерізу призми, у якому стиснута зона мала, а розтягнута напруга постійна по висоті тріщини.

Лінійна модель додатково використовує $f_{Fts} = 0{,}45\, f_{R1}$ для експлуатаційних розрахунків [13]. Ці самі моделі, з уточненими коефіцієнтами і коефіцієнтом орієнтації волокон, увійшли до Додатка L EN 1992-1-1:2023 [5], який уперше в межах Єврокодів дає єдині правила розрахунку фібробетонних конструкцій. Частковий коефіцієнт надійності для СФБ у розтягу в граничному стані прийнято $\gamma_F = 1{,}5$ [13].

Вимоги до бетонних сумішей і бетону загалом в Україні встановлені ДСТУ Б В.2.7-176:2008 [14], а розрахунок бетонних і залізобетонних конструкцій – ДБН В.2.6-98:2009 [15]. Окремих національних правил розрахунку СФБ за залишковою міцністю на сьогодні немає, тому в роботі використано fib Model Code 2010 і Додаток L Єврокоду 2 як найбільш розвинену і гармонізовану з європейською практикою базу.

1.4 Застосування сталефібробетону у збірних виробах

Збірні вироби є найбільш вдалою сферою застосування СФБ із кількох причин. По-перше, у заводських умовах легше забезпечити рівномірне дозування і перемішування фібри, ніж на будівельному майданчику. По-друге, збірні елементи зазнають значних впливів під час розпалублення, складування, транспортування і монтажу – саме тих, яким фібра найкраще протидіє (відколи

кромок, тріщини від ударів). По-третє, багато збірних виробів працюють за помірних зусиль, але мають складну форму, у якій каркас дорогий.

Найбільш показовий приклад – сегменти оброблення тунелів. Настанови робочої групи ITA [2] детально розглядають проєктування сегментів як із традиційним, так і з фібровим армуванням, і зазначають, що основні розрахункові ситуації для сегмента – тимчасові: розпалублення, складування штабелем, дія домкратів щита, – а у них фібробетон зазвичай має перевагу. Огляд досвіду великих тунелів [3] свідчить, що сегменти зі СФБ без стрижневої арматури або з мінімальним каркасом стали звичайним рішенням для тунелів великого діаметра, а головною причиною вибору називають зменшення пошкоджень кромок і спрощення виробництва.

Другий масовий напрям – труби і кільця колодязів. Виробники зазначають, що застосування сталевої фібри у збірних трубах дає змогу відмовитися від спіральних каркасів у трубах малих і середніх діаметрів, покращити опір ударам під час монтажу і безтраншейного продавлювання [4]. Польові порівняння систем армування промислових плит і плит на ґрунті, оприлюднені виробниками дисперсної арматури [16], також показують, що вирішальним чинником вибору є праця з укладання арматури.

Третій напрям – плити: плити перекриття лотків і каналів, плити на ґрунті, елементи благоустрою. Для них характерні малі прольоти і невеликі моменти, за яких мінімальне конструктивне армування часто перевищує потрібне за розрахунком. Саме такі елементи найлегше перевести на СФБ.

Узагальнення сфер застосування наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Застосування сталефібробетону в збірних виробах (узагальнено автором за [1, 2, 3, 4])

Вид виробу	**Роль фібри**	**Характерна витрата, кг/м³**	**Чи зберігається стрижнева арматура**
Сегменти оброблення тунелів	основне армування, стійкість кромок	30–50	ні або мінімальний каркас
Труби, кільця колодязів	заміна спіральних каркасів	20–40	ні для малих діаметрів

Продовження таблиці 1.3

Вид виробу	Роль фібри	Характерна витрата, кг/м³	Чи зберігається стрижнева арматура
Плити лотків, каналів, благоустрою	заміна сіток	25–40	ні
Плити на ґрунті, підлоги	контроль тріщин, заміна сіток	20–35	ні або сітка біля швів
Балки, ригелі, плити перекриття	поперечне армування, тріщиностійкість	30–60	так (комбіноване армування)

1.5 Підходи до підбору складу сталефібробетону

Фібра впливає на структуру бетонної суміші: жорсткі видовжені волокна погіршують рухливість, порушують упаковку крупного заповнювача і за надмірної витрати утворюють грудки. Тому склад СФБ не можна отримати простим додаванням фібри до звичайного бетону.

Найповніше емпіричне узагальнення складів СФБ виконали Garcia-Taengua, Bakhshi і Ferrara [17], проаналізувавши базу опублікованих сумішей. За їхніми даними, сталеву фібру зазвичай застосовують в об'ємному вмісті від 0,43 до 1,0 %, медіана становить 0,51 %, а для 75 % складів вміст не перевищує 1,0 % [17]. Водоцементне відношення в типових складах – 0,36–0,50, витрата цементу – 360–485 кг/м³, медіанна витрата в'яжучого – 450 кг/м³; суперпластифікатор застосовано в 79 % складів. На основі регресійних моделей автори запропонували практичну методику: відношення крупного заповнювача до дрібного і витрата щебеню зменшуються зі збільшенням витрати і довжини фібри, причому до вмісту близько 0,54 % вміст щебеню майже не залежить від довжини волокна і становить 800–850 кг/м³ [17]. Під час перевірки на 100 незалежних складах середнє відхилення прогнозу становило 5,9 % для в'яжучого і 12–16 % для заповнювачів, тобто методика дає добре початкове наближення, яке уточнюють пробними замісами.

Основні рекомендації щодо параметрів суміші зведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Рекомендовані діапазони параметрів складу сталефібробетону (за [1, 17])

Параметр	Рекомендований діапазон	Пояснення
Об'ємний вміст фібри V_f	0,25–1,0 % (20–80 кг/м³)	понад 1 % – різке погіршення рухливості
Водоцементне відношення	0,36–0,50	визначається класом бетону
Витрата в'яжучого	360–485 кг/м³ (медіана 450)	більше тіста для обволікання волокон
Частка піску в суміші заповнювачів	зростає з RI	компенсація порушення упаковки щебеню
Найбільша крупність заповнювача	≤ 0,5 l_f, переважно 10–16 мм	волокно має перетинати зерно
Суперпластифікатор	у ~80 % складів	збереження рухливості без додаткової води

Наведені в огляді [1] дані додатково показують, що найчастіше випробовують дозування 0,5; 0,75 і 1 % за об'ємом, а для самоущільнюваного СФБ оптимальною вважалася витрата близько 1 %. Водночас для збірних виробів економічно доцільні менші витрати, тому задача полягає не в пошуку «найкращої» міцності, а в мінімальній витраті, що забезпечує потрібний клас.

1.6 Висновки до розділу 1 і завдання досліджень

1. Головна властивість сталефібробетону – опір розтягу після утворення тріщини, який характеризується залишковою міцністю f_{R1} і f_{R3} за EN 14651 і класом за fib Model Code 2010; міцність на стиск від фібри змінюється несуттєво.

2. Ефективність фібри визначається індексом армування $RI = V_f l_f/d_f$, міцністю матриці і формою анкерування. Додаток L EN 1992-1-1:2023 створив нормативну основу для розрахунку фібробетонних конструкцій.

3. Найдоцільніші сфери застосування СФБ у збірному залізобетоні – сегменти тунелів, труби і кільця, плити малих прольотів, тобто вироби з помірними зусиллями і трудомісткими каркасами. Типова витрата фібри 20–50 кг/м³.

4. Узагальнення складів СФБ показує, що частку піску і суперпластифікатора слід збільшувати зі зростанням вмісту фібри; медіанний об'ємний вміст фібри – близько 0,5 %.

На основі аналізу поставлено завдання: розробити алгоритм оптимізації складу СФБ за мінімальною вартістю з обмеженнями за класом і технологічністю (розділ 2) та виконати техніко-економічне порівняння варіантів армування характерних збірних виробів (розділ 3).

Розділ 2

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ ДЛЯ ЗБІРНИХ ВИРОБІВ

2.1 Постановка задачі оптимізації

Для заводу ЗБВ задача підбору складу СФБ формулюється так: для заданого класу бетону за міцністю на стиск і потрібного класу за залишковою міцністю знайти тип фібри і її витрату D, які мінімізують вартість 1 м³ суміші з урахуванням витрат, пов'язаних із фіброю:

$$C(D, \text{тип}) = C_м + D \cdot Ц_ф \rightarrow \min, \qquad (2.1)$$

де $C_м$ – вартість бетонної матриці, грн/м³; D – витрата фібри, кг/м³; $Ц_ф$ – ціна фібри, грн/кг.

Обмеження задачі:

– за класом: $f_{R1k}(D) \geq f_{R1k,тр}$ і $f_{R3k}(D) \geq f_{R3k,тр}$;

– за технологічністю: $RI \leq RI_{гр}$ і середня відстань між волокнами не менша за найбільший розмір заповнювача;

– за статистичною забезпеченістю: імовірність підтвердження класу під час виробничого контролю не менша за 0,95.

Алгоритм розв'язання наведено на рис. 2.1. Його відмінність від звичайного підбору складу полягає в кроках перевірки технологічності та статистичної забезпеченості, а також у тому, що результат передається на техніко-економічне порівняння з варіантом стрижневого армування (розділ 3).

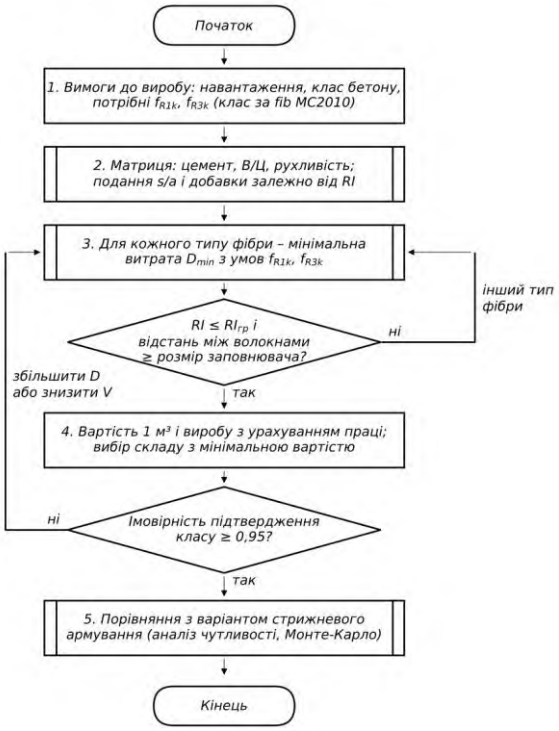

Рис. 2.1 Алгоритм оптимізації складу сталефібробетону для збірного виробу (розроблено автором)

Для всіх складів прийнято одну бетонну матрицю класу С30/37, що є типовим для плит, кілець і труб. Використання однієї матриці з різною витратою фібри зручне для заводу: змінюється лише дозування фібри і суперпластифікатора, а не вся рецептура.

2.2 Параметри армування фіброю

Індекс армування за формулою (1.1) лінійно зростає з витратою фібри, а нахил залежності визначається відношенням l/d (рис. 2.2). За однакової маси фібра 60/0,75 (l/d = 80) дає на 25 % більший RI, ніж 35/0,55, і на 60 % більший, ніж 50/1,0.

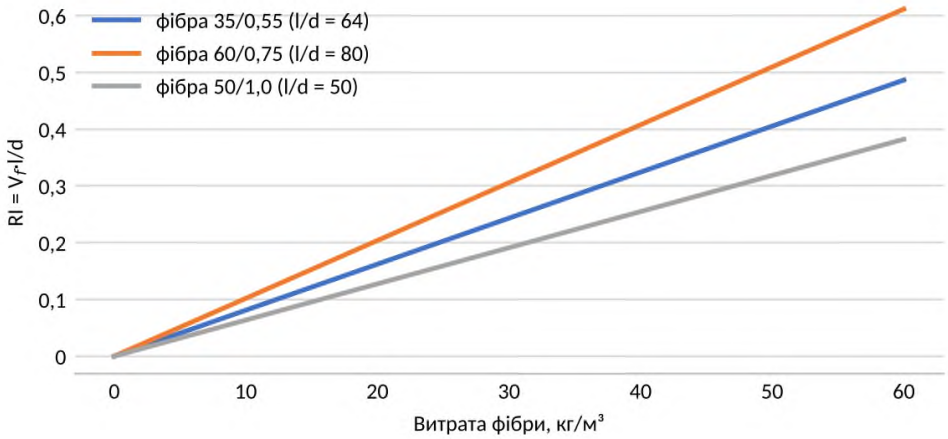

Рис. 2.2 Індекс армування залежно від витрати фібри різних типів (розрахунок автора)

Кількість волокон в 1 м³ і середню відстань між ними автор визначив з умови рівномірного розподілу волокон:

$$N = V_f / (\pi\, d_f^2\, l_f / 4), \quad s = (\pi\, d_f^2\, l_f / (4\, V_f))^{1/3}, \qquad (2.2)$$

де N – кількість волокон в 1 м³; s – середня відстань між центрами волокон, мм.

Результати наведено на рис. 2.3 і в табл. 2.1. Коротка тонка фібра 35/0,55 за витрати 30 кг/м³ дає майже 460 тис. волокон в 1 м³ – утричі більше, ніж фібра 60/0,75, і вчетверо більше, ніж 50/1,0. Середня відстань між волокнами при цьому становить 13,0; 19,1 і 21,7 мм відповідно. Оскільки для тонкостінних виробів (кільце з товщиною стінки 80 мм) важить саме кількість волокон, що перетинають можливу тріщину, тонка фібра там вигідніша, тоді як для плит, де важить анкерування за великого розкриття тріщини, – довга.

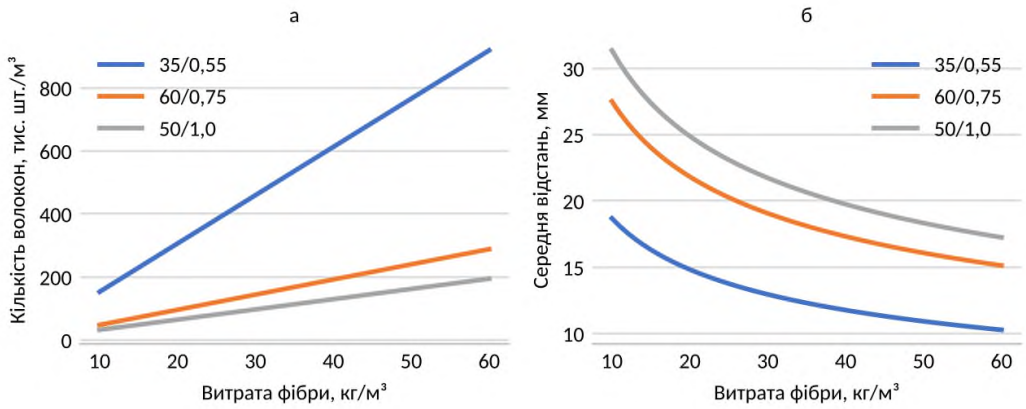

Рис. 2.3 Кількість волокон в 1 м³ (а) і середня відстань між ними (б) (розрахунок автора)

Таблиця 2.1

Кількість волокон і середня відстань між ними (розрахунок автора)

Фібра	N, тис. шт./м³, при D = 20 / 30 / 40 кг/м³	s, мм, при D = 20 / 30 / 40 кг/м³
35/0,55	306 / 460 / 613	14,8 / 13,0 / 11,8
60/0,75	96 / 144 / 192	21,8 / 19,1 / 17,3
50/1,0	65 / 97 / 130	24,9 / 21,7 / 19,8

Порівняння відстані між волокнами з крупністю заповнювача дає технологічну перевірку: для щебеню фракції 5–20 мм відстань між волокнами менше 15 мм означає, що зерна щебеню заважатимуть рівномірному розподілу волокон. Тому для фібри 35/0,55 у разі витрати понад 25 кг/м³ доцільно зменшувати найбільшу крупність щебеню до 10–16 мм. Як технологічне обмеження прийнято $RI_{гр} = 0,6$ – за цієї межі витрата фібри 60/0,75 становить близько 59 кг/м³, тобто вміст 0,75 %, що лишається в межах типових складів за [17].

2.3 Розрахунок складів методом абсолютних об'ємів

Склад визначено методом абсолютних об'ємів: сума об'ємів усіх компонентів і повітря дорівнює 1000 л. Вихідні параметри матриці: портландцемент CEM I 42,5 R, витрата 400 кг/м³; вода 172 л (В/Ц = 0,43); пісок кварцовий середньої крупності ($\rho = 2,65$ кг/л); щебінь гранітний фракції 5–20 мм ($\rho = 2,70$ кг/л); полікарбоксилатний суперпластифікатор; вміст залученого повітря 2 %. Об'єм заповнювачів

$$V_з = 1000 - Ц/\rho_ц - В - Д_{сп}/\rho_{сп} - V_{пов} - D/\rho_ф, \qquad (2.3)$$

де Ц, В, $Д_{сп}$ – витрати цементу, води і суперпластифікатора; $V_{пов}$ – об'єм повітря, л; $\rho_ф = 7,85$ кг/л – густина сталі.

Відповідно до закономірності, встановленої в [17], частку піску в суміші заповнювачів прийнято зростаючою з індексом армування, а дозування суперпластифікатора – збільшеним для збереження рухливості без додаткової води:

$$r = 0,42 + 0,20 \cdot RI, \quad Д_{сп} = (0,9 + 1,0 \cdot RI)\ \%\ \text{від маси цементу.} \qquad (2.4)$$

Результати розрахунку для фібри 60/0,75 наведено в табл. 2.2 і на рис. 2.4. Зі збільшенням витрати фібри від 0 до 50 кг/м³ частка піску зростає з 0,42 до 0,52, відношення щебеню до піску зменшується з 1,41 до 0,93, а витрата щебеню – з 1058 до 861 кг/м³. Отримані витрати щебеню за вмісту фібри до 0,5 % (900–980 кг/м³) лише трохи перевищують діапазон 800–850 кг/м³ за [17], що пояснюється меншою витратою в'яжучого (400 кг/м³ проти медіанних 450 кг/м³).

Таблиця 2.2

Склади сталефібробетону С30/37 з фіброю 60/0,75 на 1 м³ (розрахунок автора)

Показник	СФБ-0	СФБ-20	СФБ-30	СФБ-40	СФБ-50
Фібра D, кг	0	20	30	40	50
V_f, %	0	0,255	0,382	0,510	0,637
RI	0	0,204	0,306	0,408	0,510
Цемент, кг	400	400	400	400	400
Вода, л	172	172	172	172	172
Суперпластифікатор, кг (% Ц)	3,60 (0,90)	4,42 (1,10)	4,82 (1,21)	5,23 (1,31)	5,64 (1,41)
Частка піску r	0,420	0,461	0,481	0,502	0,522
Пісок, кг	752	821	855	889	923
Щебінь, кг	1058	979	940	900	861
Розрахункова густина, кг/м³	2386	2396	2401	2407	2412
Вартість матеріалів, грн/м³	3353	4710	5389	6067	6746

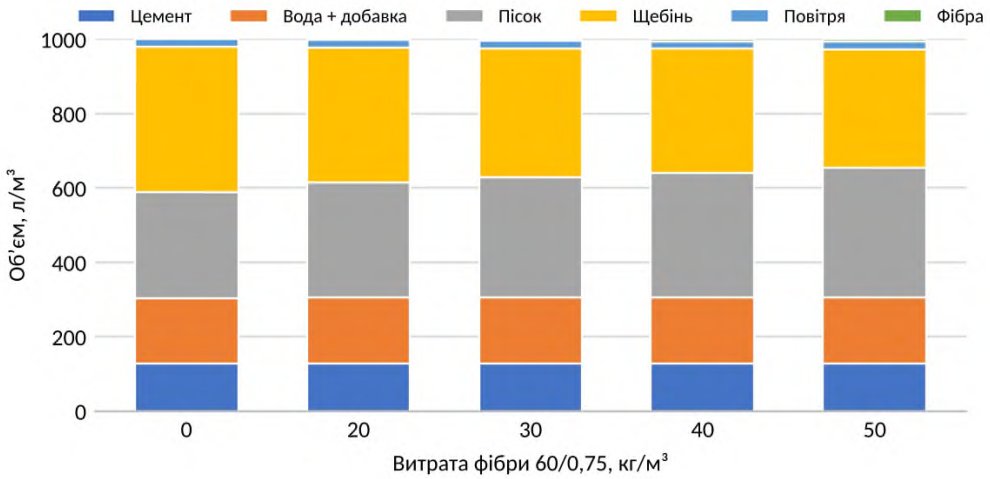

Рис. 2.4 Об'ємний склад сталефібробетону залежно від витрати фібри (розрахунок автора)

Вартість матеріалів визначено за базовими розрахунковими цінами: цемент 4,30 грн/кг, пісок 0,45 грн/кг, щебінь 0,90 грн/кг, суперпластифікатор 95 грн/кг, фібра 60/0,75 – 66 грн/кг, 35/0,55 – 62 грн/кг, 50/1,0 – 55 грн/кг. Абсолютні ціни змінюються, тому в розділі 3 їхній вплив перевірено аналізом чутливості. Уже з табл. 2.2 видно головну економічну особливість СФБ: збільшення частки піску і суперпластифікатора здорожчує матрицю лише на 1–3 %, тоді як кожні 10 кг фібри додають 660 грн/м³, тобто вартість суміші фактично визначається витратою фібри.

2.4 Прогнозування залишкової міцності

Для розрахунку залишкової міцності прийнято модель, структура якої відповідає встановленій у [11] пропорційності залишкової міцності індексу армування і кореню квадратному з міцності бетону на стиск:

$$f_{R1m} = \alpha_1 \cdot RI \cdot (f_{cm}/38)^{0,5}, \quad f_{R3m} = f_{R1m} \cdot (0,55 + 0,009\, l_f), \tag{2.5}$$

де f_{cm} – середня міцність матриці на стиск, МПа (для C30/37 f_{cm} = 38 МПа); α_1 = 13 МПа – коефіцієнт моделі; другий множник описує зростання відношення f_{R3}/f_{R1} зі збільшенням довжини волокна.

Коефіцієнти моделі (2.5) прийнято як методичне припущення роботи, що відповідає порядку значень залишкової міцності для фібри з анкерами в бетоні класу C30/37 і закономірності, за якою довга фібра краще працює за великого розкриття тріщини. На реальному підприємстві коефіцієнти α_1 і відношення f_{R3}/f_{R1} визначають за результатами випробувань пробних замісів за EN 14651 [12], після чого алгоритм розділу 2.1 використовується без змін.

Характеристичні значення визначено за коефіцієнтом варіації V = 20 %, характерним для залишкової міцності [13]:

$$f_{Rk} = f_{Rm}\,(1 - 1,645\ V) = 0,671\ f_{Rm}. \tag{2.6}$$

Розрахункові залежності наведено на рис. 2.5, а отримані класи – в табл. 2.3. Фібра 35/0,55 через менше відношення f_{R3}/f_{R1} = 0,865 забезпечує лише класи з літерою b, фібра 50/1,0 і 60/0,75 – класи c. За однакової витрати 40 кг/м³ фібра 60/0,75 дає клас 3c, 35/0,55 – 2,5b, а 50/1,0 – лише 2c.

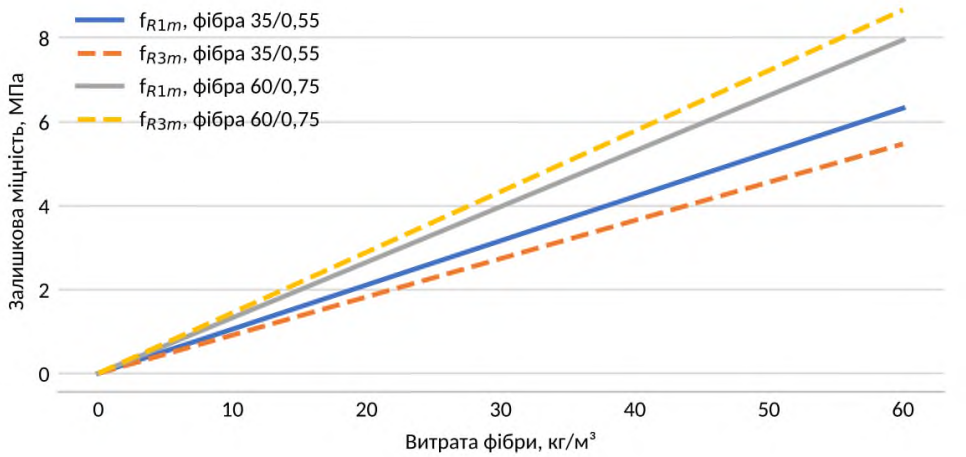

Рис. 2.5 Прогнозна залишкова міцність f_{R1m} і f_{R3m} залежно від витрати фібри (розрахунок автора за моделлю (2.5))

Таблиця 2.3

Клас сталефібробетону за fib MC2010 залежно від типу і витрати фібри (розрахунок автора)

Фібра	**20 кг/м³**	**25 кг/м³**	**30 кг/м³**	**35 кг/м³**	**40 кг/м³**	**50 кг/м³**
35/0,55	1b	1,5b	2b	2b	2,5b	3b
60/0,75	1,5c	2c	2,5c	3c	3c	4c
50/1,0	1c	1c	1,5c	1,5c	2c	2,5c

Перевірено також умову застосування СФБ як заміни арматури $f_{R1k}/f_{Lk} > 0,4$. Для матриці C30/37 межа пропорційності f_L при згині становить близько 4–5 МПа, тому умова виконується вже за класу 2 і вище; умова $f_{R3k}/f_{R1k} > 0,5$ для всіх розглянутих фібр виконується з запасом.

2.5 Вибір типу і витрати фібри для заданого класу

За моделлю (2.5) для кожного типу фібри визначено мінімальну витрату, яка забезпечує класи 2c, 3b, 3c і 4c (табл. 2.4), і вартість фібри в 1 м³ (рис. 2.6).

Таблиця 2.4

Мінімальна витрата фібри (кг/м³) і її вартість (грн/м³) для заданого класу (розрахунок автора)

Клас	**35/0,55**	**60/0,75**	**50/1,0**	**Оптимальна фібра**
2c	29,5 / 1829	22,5 / 1485	36,0 / 1980	60/0,75
3b	42,5 / 2635	34,0 / 2244	54,0 / 2970	60/0,75
3c	44,5 / 2759	34,0 / 2244	54,0 / 2970	60/0,75
4c	59,0 / 3658	45,0 / 2970	72,0* / 3960	60/0,75

Примітка: * – RI > $RI_{гр}$, склад не відповідає технологічному обмеженню.

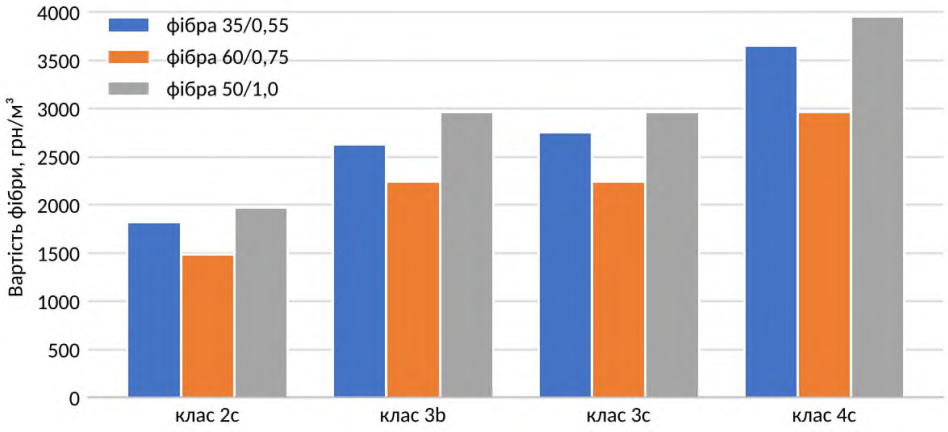

Рис. 2.6 Вартість фібри в 1 м³ для забезпечення заданого класу (розрахунок автора)

Для класів із літерою c (типових для конструкційного застосування) фібра 60/0,75 є найдешевшою, хоча її ціна за кілограм найвища: висока ефективність (l/d = 80) знижує потрібну витрату на 24–37 %. Фібра 50/1,0 хоч і дешевша за кілограм, через низьке відношення l/d потребує на 60 % більшої витрати і для класу 4c не відповідає технологічному обмеженню. Фібра 35/0,55 для класів c не підходить через недостатнє відношення f_{R3}/f_{R1}; для класів b вона дорожча за 60/0,75 на 17–23 %. Однак для тонкостінних виробів її перевагою є велика кількість волокон (табл. 2.1), тож для кільця колодязя в розділі 3 прийнято саме її.

Важливий висновок для заводу: переходити до дешевшої за кілограм фібри має сенс лише після перерахунку потрібної витрати. Порівнювати типи фібри слід за вартістю на 1 м³ для заданого класу, а не за ціною за кілограм.

2.6 Статистичне забезпечення класу методом Монте-Карло

Характеристичне значення за формулою (2.6) передбачає відомий коефіцієнт варіації. На практиці клас підтверджують за обмеженою кількістю зразків, а невідомий розкид оцінюють за ними самими. Відповідно до EN 1990 [18] за n = 6 зразків і невідомого коефіцієнта варіації характеристичне значення визначають як $f_{Rk} = f_{Rm} - k_n s$ з коефіцієнтом $k_n = 2{,}18$, а не 1,645. Тому склад,

розрахований детерміністично, може не підтвердити клас за випробуваннями навіть тоді, коли фактична якість бетону стабільна.

Автором виконано статистичне моделювання: для кожної витрати фібри 60/0,75 генерувалося 20 000 серій по 6 значень f_{R3}, розподілених нормально із середнім за моделлю (2.5) і заданим коефіцієнтом варіації V; для кожної серії перевірялася умова підтвердження класу 4c ($f_{R3k} \geq 3{,}6$ МПа). Імовірність підтвердження класу наведено на рис. 2.7.

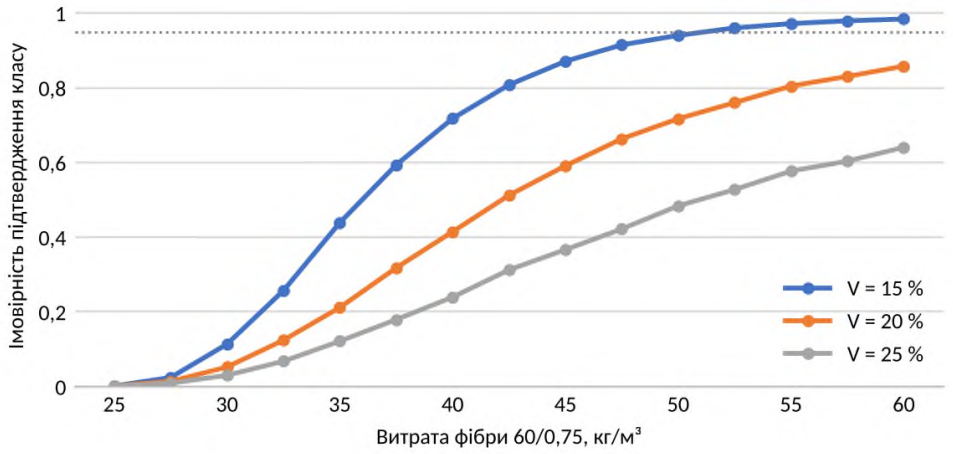

Рис. 2.7 Імовірність підтвердження класу 4c за серією з 6 зразків залежно від витрати фібри і коефіцієнта варіації (моделювання автора, 20 000 реалізацій)

За детерміністичним розрахунком клас 4c забезпечує витрата 45 кг/м³. Однак за V = 20 % імовірність підтвердити клас за такої витрати становить лише близько 0,3, а імовірність 0,95 досягається за витрати близько 79 кг/м³, тобто за межею технологічного обмеження. За V = 15 % потрібна витрата знижується до 51 кг/м³, а за V = 25 % імовірність 0,95 не досягається в розглянутому діапазоні витрат.

З цього випливає практично важливий висновок: головним резервом економії фібри на заводі є не вибір «сильнішої» фібри, а зменшення розкиду залишкової міцності – рівномірне дозування фібри (дозатор замість ручного внесення), стабільна тривалість перемішування, контроль орієнтації волокон під час формування. Зниження коефіцієнта варіації з 20 до 15 % еквівалентне економії 28 кг/м³ фібри. Друга можливість – випробовувати більше зразків: зі збільшенням n коефіцієнт k_n наближається до 1,645.

2.7 Висновки до розділу 2

1. Запропоновано алгоритм оптимізації складу СФБ за мінімальною вартістю з обмеженнями за класом залишкової міцності, технологічністю (RI ≤ 0,6, відстань між волокнами) і статистичною забезпеченістю класу.

2. Розраховано склади СФБ на основі матриці С30/37 з витратою фібри 0–50 кг/м³. Зі зростанням витрати фібри частку піску збільшено з 0,42 до 0,52, а дозування суперпластифікатора – з 0,90 до 1,41 %; вартість матриці зростає на 1–3 %, вартість суміші визначається переважно фіброю.

3. Для класів с найекономічнішою є фібра 60/0,75: для класу 3с потрібно 34 кг/м³ (2244 грн/м³), що на 19 % дешевше, ніж для фібри 35/0,55, і на 24 % дешевше, ніж для 50/1,0. Порівнювати фібру слід за вартістю на 1 м³ для заданого класу.

4. Моделювання методом Монте-Карло показало, що за 6 зразків у серії і V = 20 % детерміністично розрахована витрата забезпечує підтвердження класу лише з малою ймовірністю; зменшення коефіцієнта варіації до 15 % є найдієвішим способом економії фібри.

Розділ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ ДЛЯ ЗБІРНИХ ВИРОБІВ

3.1 Методика оцінки

Техніко-економічне порівняння виконано за прямими витратами на 1 м³ виробу, які відрізняються між варіантами армування. Загальні витрати, однакові для обох варіантів (форми, тепловологісна обробка, накладні витрати), не враховувалися, оскільки вони не впливають на різницю. Структура витрат відповідає загальним правилам визначення вартості в будівництві [19].

Вартість 1 м³ виробу зі стрижневою арматурою

$$C_{ЗБ} = C_м + m_a Ц_a + (m_a t_к / 1000 + t_у) Ц_п, \quad (3.1)$$

де m_a – витрата арматури, кг/м³; $Ц_a$ – ціна арматури, грн/кг; $t_к$ – трудомісткість виготовлення каркаса, люд.-год/т; $t_у$ – трудомісткість установлення каркаса у форму і фіксації захисного шару, люд.-год/м³; $Ц_п$ – вартість 1 люд.-год з нарахуваннями, грн.

Вартість 1 м³ виробу зі сталефібробетону

$$C_{СФБ} = C_м + D Ц_ф + t_ф Ц_п, \quad (3.2)$$

де $t_ф$ = 0,15 люд.-год/м³ – трудомісткість дозування фібри і додаткового контролю.

Базові розрахункові значення: $C_м$ = 3353 грн/м³ (матриця без фібри, табл. 2.2); $Ц_a$ = 38 грн/кг (арматура класу А500С за ДСТУ 3760 [20] разом із дротом); $Ц_п$ = 260 грн/люд.-год. Додаткові витрати суперпластифікатора в складах СФБ (до 70 грн/м³) у порівнянні не враховано як несуттєві.

Розглянуто три вироби з різним ступенем насичення арматурою і різною складністю каркаса (табл. 3.1):

– П1 – плита перекриття лотка 1700×1000×120 мм (проста сітка, мале насичення);

– П2 – стінове кільце колодязя Ø1000/1160 мм, висотою 900 мм (криволінійний каркас, тонка стінка);

– П3 – сегмент оброблення тунелю товщиною 300 мм (насичений просторовий каркас).

Таблиця 3.1

Вихідні дані виробів для техніко-економічного порівняння

Показник	П1	П2	П3
Об'єм бетону, м³	0,204	0,244	1,0 (на 1 м³)
Витрата арматури m_a, кг/м³	27,1	34,0	100,0
Трудомісткість каркаса $t_к$, люд.-год/т	22	40	25
Трудомісткість установлення $t_у$, люд.-год/м³	1,2	2,0	0,8
Тип фібри	60/0,75	35/0,55	60/0,75
Витрата фібри D, кг/м³	35,0	21,5	40,0

Для П1 витрату арматури і фібри визначено розрахунком (п. 3.2). Для кільця П2 витрату фібри визначено з умови забезпечення мінімальних залишкових міцностей $f_{R1k} \geq 1{,}5$ МПа і $f_{R3k} \geq 1{,}0$ МПа, що відповідає вимогам до фібри конструкційного призначення [10]; арматура – кільцеві й вертикальні стрижні Ø6 мм. Для сегмента П3 витрата арматури і фібри прийнята на рівні, характерному для сегментів тунелів великого діаметра за даними [2, 3]; ці значення розглядаються як вихідні дані прикладу.

3.2 Розрахунок плити перекриття лотка

Розрахункова схема плити – однопрольотна вільно оперта плита з розрахунковим прольотом $l_0 = 1{,}5$ м (рис. 3.1). Навантаження: власна вага $25 \cdot 0{,}12 = 3{,}0$ кПа, експлуатаційне (пішохідне і від легкого обслуговувального обладнання) $q_k = 10$ кПа.

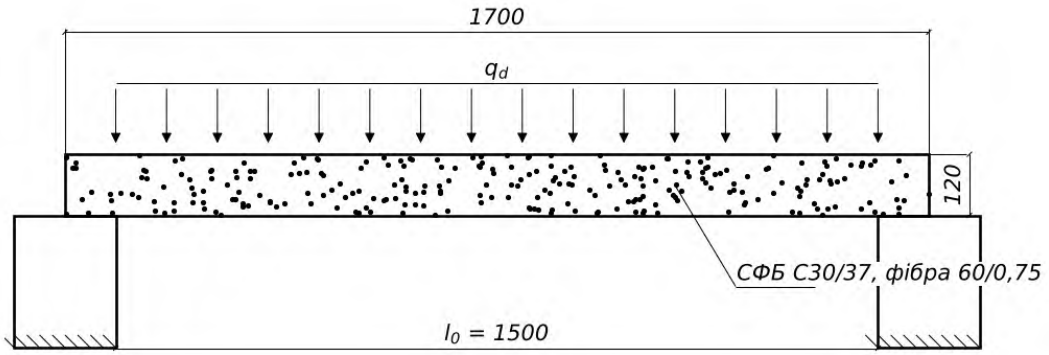

Рис. 3.1 Розрахункова схема плити перекриття лотка (розроблено автором)

Розрахункове навантаження і момент на смугу шириною 1 м:

$q_d = 1{,}35 \cdot 3{,}0 + 1{,}5 \cdot 10 = 19{,}05$ кПа; $M_{Ed} = q_d\, l_0^2 / 8 = 19{,}05 \cdot 1{,}5^2/8 = 5{,}36$ кН·м. (3.3)

Варіант зі стрижневою арматурою. За робочої висоти d = 95 мм і f_{yd} = 500/1,15 = 435 МПа потрібна площа арматури

$$A_s = M_{Ed} / (0{,}9\, d\, f_{yd}) = 5{,}36 \cdot 10^6 / (0{,}9 \cdot 95 \cdot 435) = 144 \text{ мм}^2/\text{м}. \quad (3.4)$$

Мінімальна площа арматури $A_{s,min} = 0{,}26\, f_{ctm}/f_{yk} \cdot b\, d = 0{,}26 \cdot 2{,}9/500 \cdot 1000 \cdot 95 = 143$ мм²/м, тобто розрахункове армування практично збігається з мінімальним. Прийнято сітку з дроту Ø6 мм з кроком 150 мм в обох напрямках (189 мм²/м), що з урахуванням монтажних стрижнів і петель дає 27,1 кг/м³.

Варіант зі СФБ без стрижневої арматури. За жорстко-пластичною моделлю (1.3) розрахунковий опір перерізу $M_{Rd} = f_{Ftu,d}\, b\, h^2/2$. З умови $M_{Rd} \geq M_{Ed}$:

$f_{Ftu,d} \geq 2\, M_{Ed} / (b\, h^2) = 2 \cdot 5{,}36 \cdot 10^6 / (1000 \cdot 120^2) = 0{,}744$ МПа; $f_{R3k} \geq 3\, \gamma_F\, f_{Ftu,d} = 3 \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}744 = 3{,}35$ МПа. (3.5)

За моделлю (2.5) для фібри 60/0,75 ця вимога виконується за витрати D = 35 кг/м³ (f_{R3k} = 3,39 МПа, клас 3c); для фібри 35/0,55 потрібно 55 кг/м³, для 50/1,0 – 60,5 кг/м³. Прийнято фібру 60/0,75, D = 35 кг/м³. Оскільки плита є статично визначуваним елементом без перерозподілу зусиль, для промислового застосування рекомендується підтвердити рішення випробуванням дослідних плит навантаженням.

Залежність потрібної витрати фібри від прольоту для різних товщин і навантажень наведено на рис. 3.2. За прольоту 1,0 м витрату визначає мінімальна вимога $f_{R1k} \geq 1{,}5$ МПа (17 кг/м³), а вже за прольоту 2,0 м для плити товщиною 120 мм потрібно 61,5 кг/м³, що перевищує технологічну межу. Збільшення товщини до 140 мм знижує потрібну витрату за прольоту 2,0 м до 47 кг/м³. Отже, СФБ без арматури доцільний для плит прольотом до 1,5–1,8 м; для більших прольотів раціональне комбіноване армування.

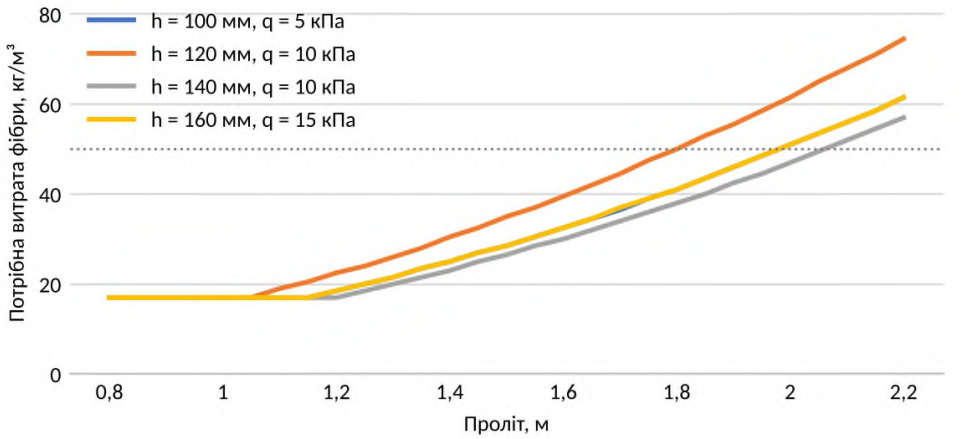

Рис. 3.2 Потрібна витрата фібри 60/0,75 залежно від прольоту плити (розрахунок автора)

3.3 Порівняння вартості для трьох виробів

Результати розрахунку за формулами (3.1), (3.2) наведено в табл. 3.2 і на рис. 3.3.

Таблиця 3.2

Порівняння прямих витрат на армування виробів (розрахунок автора)

Показник	П1	П2	П3
$C_{ЗБ}$, грн/м³	4851	5519	8011
$C_{СФБ}$, грн/м³	5702	4725	6032
Різниця $C_{СФБ} - C_{ЗБ}$, грн/м³	+851	–794	–1979
Різниця, %	+17,5	–14,4	–24,7
Вартість виробу ЗБ / СФБ, грн	990 / 1163	1348 / 1154	8011 / 6032
Трудомісткість армування ЗБ / СФБ, люд.-год/м³	1,80 / 0,15	3,36 / 0,15	3,30 / 0,15
Беззбиткова ціна фібри, грн/кг	41,7	98,9	115,5

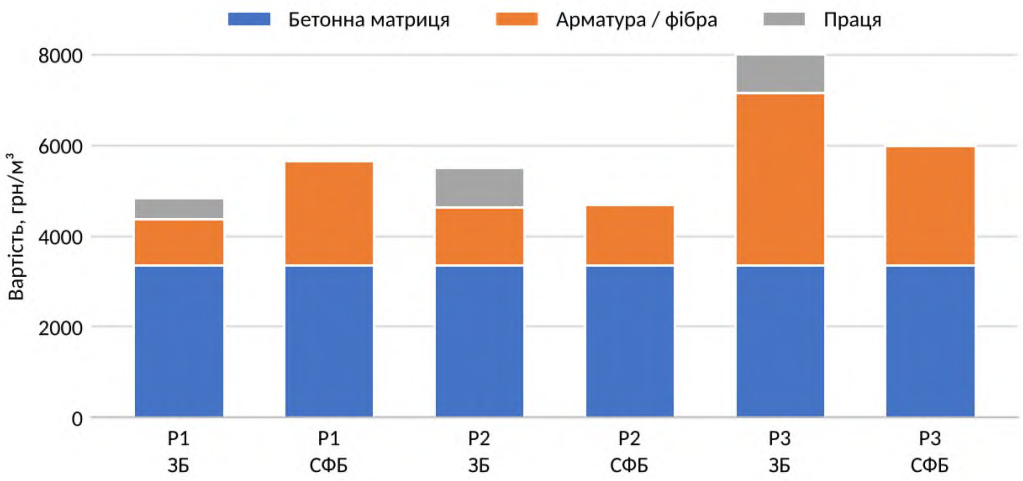

Рис. 3.3 Структура прямих витрат на 1 м³ виробів зі стрижневою арматурою (ЗБ) і сталефібробетону (СФБ) (розрахунок автора)

Результати не однозначні, і це, на думку автора, найважливіший висновок розділу. Для плити лотка П1 СФБ дорожчий на 17,5 %: армування мінімальне, каркас простий, а потрібна витрата фібри (35 кг/м³) за масою перевищує витрату арматури (27 кг/м³) і коштує дорожче за кілограм. Для кільця П2 СФБ дешевший на 14,4 %: криволінійний каркас тонкостінного виробу дуже трудомісткий (3,36 люд.-год/м³), а потрібна витрата фібри невелика. Для сегмента тунелю П3 економія найбільша – 24,7 %, оскільки витрата арматури в 2,5 раза більша за витрату фібри.

В усіх трьох випадках трудомісткість армування зменшується в 12–22 рази. Цей ефект має значення, яке не відображається у вартості 1 м³: звільнення працівників арматурного цеху і скорочення тривалості циклу формування дозволяє збільшити випуск продукції на наявних формах. Крім того, вироби зі СФБ менше пошкоджуються під час розпалублення і транспортування, що зменшує брак [1, 2].

Показником, що узагальнює результат, є беззбиткова ціна фібри – ціна, за якої варіанти рівновартісні:

$$Ц_ф^* = (m_a Ц_a + (m_a t_к/1000 + t_у – t_ф) Ц_п) / D. \quad (3.6)$$

Для П1 вона становить 41,7 грн/кг – нижче за ринкові ціни фібри, тоді як для П2 і П3 – 98,9 і 115,5 грн/кг, тобто з великим запасом.

3.4 Аналіз чутливості й беззбиткова ціна

Аналіз чутливості виконано зміною кожного вхідного параметра на ±20 % (витрати фібри – на ±10 %, що відповідає точності прогнозної моделі). Результати для П1 і П3 наведено на рис. 3.4 і рис. 3.5.

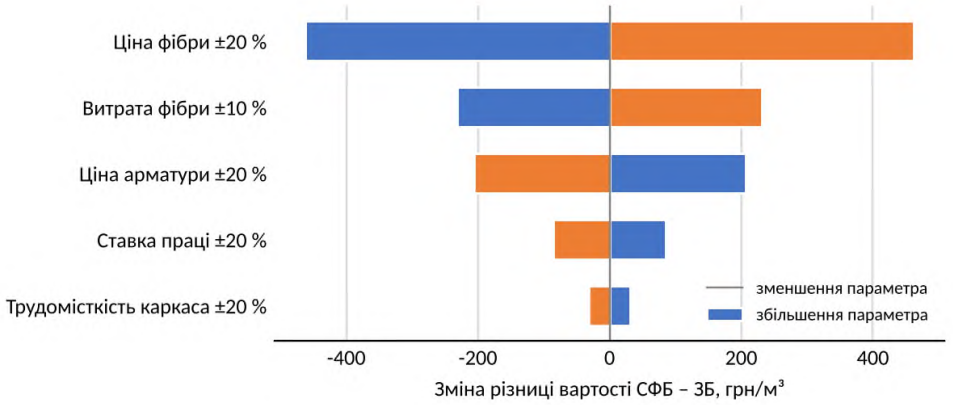

Рис. 3.4 Чутливість різниці вартості СФБ і ЗБ для плити П1 (розрахунок автора)

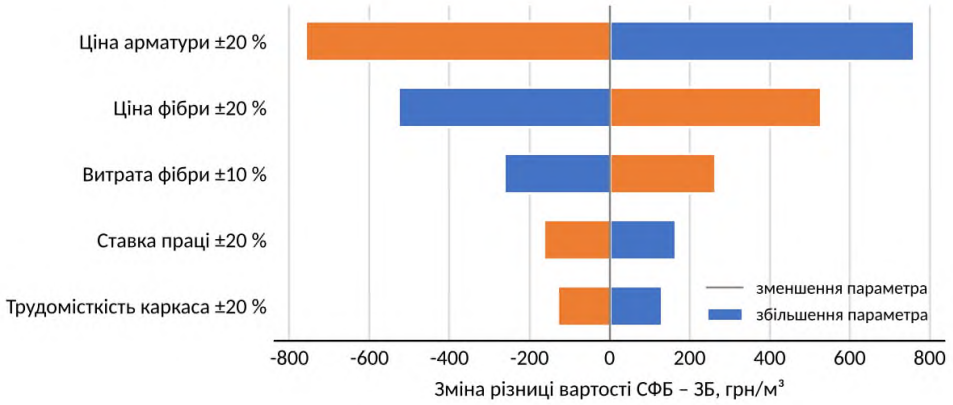

Рис. 3.5 Чутливість різниці вартості СФБ і ЗБ для сегмента П3 (розрахунок автора)

Для плити П1 найвпливовішим параметром є ціна фібри (±462 грн/м³), далі витрата фібри (±231 грн/м³) і ціна арматури (±206 грн/м³). Жодна зі змін у межах ±20 % не робить СФБ дешевшим за базову різницю +851 грн/м³: для П1 висновок стійкий. Для сегмента П3 найвпливовішою є ціна арматури (±760 грн/м³), друге місце займає ціна фібри (±528 грн/м³), а вплив ставки праці помірний (±164 грн/м³), оскільки праця – лише частина вартості каркаса. Висновок про перевагу СФБ для П3 також стійкий.

Залежність беззбиткової ціни фібри від вартості праці (рис. 3.6) дозволяє заводу оцінити доцільність СФБ за власних умов. Сірою смугою на графіку

показано діапазон розрахункових цін фібри (55–66 грн/кг). Для П2 і П3 беззбиткова ціна перевищує ринкову за будь-якої вартості праці в діапазоні 150–500 грн/люд.-год. Для П1 беззбиткова ціна зростає зі ставкою праці, але навіть за 500 грн/люд.-год не досягає ринкової: для простих плит малої товщини СФБ без арматури економічно невигідний, і його застосування може обґрунтовуватися лише технологічними перевагами (довговічність, стійкість кромок, звільнення арматурного цеху).

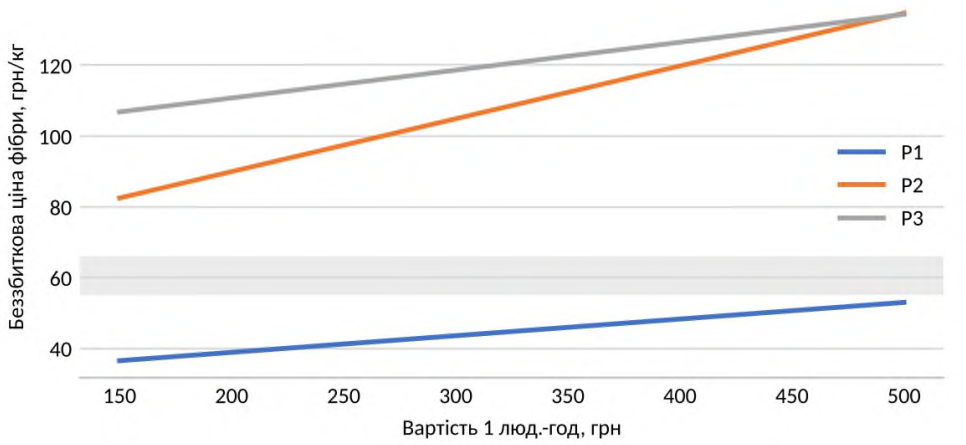

Рис. 3.6 Беззбиткова ціна фібри залежно від вартості праці (розрахунок автора)

3.5 Оцінка ризику методом Монте-Карло

Аналіз чутливості змінює параметри поодинці, тоді як на практиці ціни змінюються одночасно. Для оцінки ризику автором виконано моделювання: ціни фібри й арматури, вартість праці і трудомісткість каркаса задано трикутними розподілами з межами ±20 % від базових значень, витрату фібри – нормальним розподілом з коефіцієнтом варіації 5 %; виконано 20 000 реалізацій. Розподіли різниці вартості показано на рис. 3.7, а статистичні характеристики – в табл. 3.3.

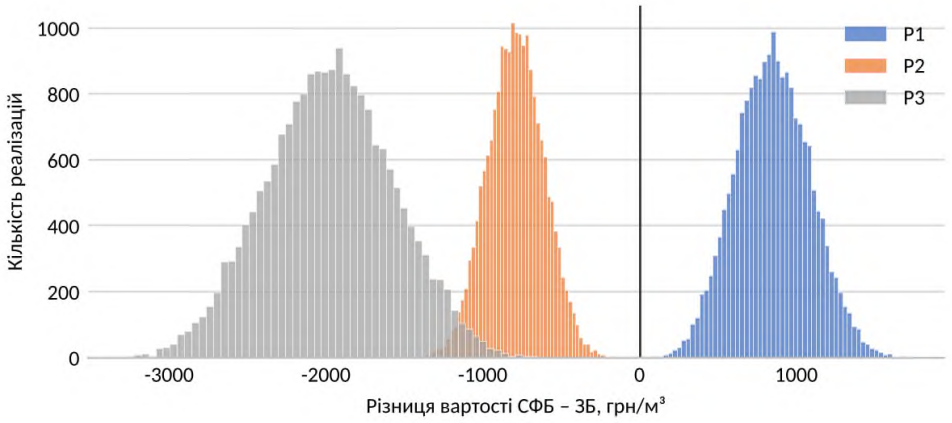

Рис. 3.7 Розподіл різниці вартості СФБ і ЗБ для трьох виробів (моделювання автора, 20 000 реалізацій)

Таблиця 3.3

Результати моделювання різниці вартості $C_{СФБ} – C_{ЗБ}$, грн/м³ (розрахунок автора)

Виріб	**Середнє**	**5-й процентиль**	**95-й процентиль**	**Імовірність, що СФБ дешевший, %**
П1	848	459	1250	0
П2	–792	–1086	–495	100
П3	–1978	–2650	–1300	100

За одночасної зміни всіх цін у межах ±20 % знак різниці не змінюється в жодній реалізації: для П1 СФБ завжди дорожчий, для П2 і П3 – завжди дешевший. Отже, висновки розділу є стійкими до невизначеності цін, а вирішальним чинником є не ціни, а співвідношення трудомісткості каркаса і потрібної витрати фібри, яке визначається конструкцією виробу.

3.6 Рекомендації щодо впровадження на заводі ЗБВ

На основі виконаних розрахунків сформульовано рекомендації:

– першочергово переводити на СФБ вироби з трудомісткими каркасами за помірних зусиль: кільця колодязів, труби малих діаметрів, тонкостінні лотки і сегменти; для простих плит з мінімальним армуванням заміна економічно невигідна;

– порівнювати типи фібри за вартістю на 1 м³ для заданого класу; для плит і сегментів – фібра з $l/d \approx 80$, для тонкостінних виробів – коротка тонка фібра з більшою кількістю волокон;

– використовувати одну матрицю С30/37 для всієї номенклатури СФБ, змінюючи лише витрату фібри, частку піску і суперпластифікатора за формулами (2.4);

– до серійного випуску провести випробування пробних замісів за EN 14651 і уточнити коефіцієнти моделі (2.5), а також випробувати дослідні вироби навантаженням;

– забезпечити механізоване дозування фібри і стабільний режим перемішування, оскільки зниження коефіцієнта варіації залишкової міцності з 20 до 15 % дає більшу економію фібри, ніж вибір іншого її типу;

– для плит прольотом понад 1,5–1,8 м застосовувати комбіноване армування (фібра + полегшена сітка).

3.7 Висновки до розділу 3

1. Розроблено методику техніко-економічного порівняння варіантів армування збірних виробів за прямими витратами з урахуванням трудомісткості каркаса; узагальнюючим показником є беззбиткова ціна фібри.

2. Для плити лотка 1700×1000×120 мм СФБ із фіброю 60/0,75 (35 кг/м³) забезпечує потрібну несучу здатність, але дорожчий за варіант із сіткою на 17,5 %; для кільця колодязя і сегмента тунелю СФБ дешевший на 14,4 і 24,7 % відповідно. Трудомісткість армування в усіх випадках зменшується в 12–22 рази.

3. Аналіз чутливості і моделювання методом Монте-Карло показали, що висновки стійкі до зміни цін у межах ±20 %; вирішальним є відношення трудомісткості арматурних робіт до витрати фібри.

4. СФБ без стрижневої арматури доцільний для плит прольотом до 1,5–1,8 м; за більших прольотів потрібна витрата фібри перевищує технологічну межу.

Розділ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Особливості умов праці під час виробництва виробів зі сталефібробетону

Виробництво збірних виробів зі СФБ здійснюється у формувальних цехах заводу ЗБВ і включає приготування бетонної суміші в бетонозмішувальному вузлі, дозування фібри, транспортування суміші, формування з ущільненням на віброплощадці або глибинними вібраторами, тепловологісну обробку, розпалублення і складування. Порівняно з виробництвом звичайних залізобетонних виробів зменшується обсяг арматурних робіт (різання, гнуття, зварювання), а отже, і пов'язані з ними небезпеки – іскри, зварювальні аерозолі, травми під час роботи з арматурними верстатами. Водночас з'являються специфічні фактори: робота з гострими сталевими волокнами, пил і шум під час завантаження фібри, ризик травмування рук і очей волокнами, що виступають на поверхні свіжовідформованих виробів.

Загальні вимоги до безпечного виконання робіт встановлено Законом України «Про охорону праці» [21] і ДБН А.3.2-2-2009 [22]. До робіт допускаються працівники, які пройшли медичний огляд, навчання і перевірку знань з охорони праці, вступний і первинний інструктажі на робочому місці; до роботи з дозатором фібри і віброплощадкою – після інструктажу за відповідною інструкцією з охорони праці.

4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Основні фактори, джерела і заходи захисту наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори під час виробництва виробів зі СФБ

Фактор	Джерело	Заходи захисту
Гострі кромки і кінці волокон	розпакування мішків і коробок з фіброю, завантаження дозатора, обробка поверхні виробів	рукавиці з захистом від порізів, захисні окуляри, механізоване завантаження, заборона ручного розгортання грудок фібри

Продовження таблиці 4.1

Фактор	Джерело	Заходи захисту
Підвищений рівень шуму	віброплощадка, бетонозмішувач, компресор, вібродозатор фібри	віброізоляція, звукоізолювальні кожухи, протишумні навушники, обмеження часу перебування
Загальна і локальна вібрація	віброплощадка, глибинні вібратори	віброізольовані робочі місця, рукавиці, регламентовані перерви
Пил цементу	завантаження сухих компонентів, дозувальне відділення	герметизація, аспірація, загальнообмінна вентиляція, респіратори
Ураження електричним струмом	приводи змішувача, віброплощадки, ручні вібратори у вологому середовищі	заземлення, ПЗВ, інструмент класу II–III, контроль ізоляції
Падіння вантажів	кран-балки, мостові крани, переміщення форм і виробів	справні стропи, знак заборони перебування під вантажем, атестовані стропальники
Підвищена температура і вологість	камери тепловологісної обробки	теплоізоляція, блокування дверей, вентиляція перед входом
Хімічна дія цементу і добавок	свіжа суміш, суперпластифікатор, мастила для форм	гумові рукавиці, спецодяг, засоби промивання очей
Магнітні і металеві відходи	розсипана фібра на підлозі	прибирання магнітними підмітальниками, щоденне прибирання

Слід звернути увагу на фактор, специфічний саме для СФБ, – розсипані волокна. Вони травмують ноги через взуття з тонкою підошвою і пошкоджують шини колісного транспорту. Тому робочі місця біля дозатора і формувальних постів потрібно щоденно прибирати магнітними підмітальними пристроями, а працівників забезпечувати взуттям із захисною підошвою.

4.3 Оцінка рівня шуму на робочому місці формувальника

Допустимий еквівалентний рівень звуку на постійних робочих місцях відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 [23] становить 80 дБА. На робоче місце формувальника одночасно діють кілька джерел шуму, сумарний рівень яких визначається за формулою

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \Sigma 10^{0,1Li}\}, \qquad (4.1)$$

де L_i – рівень звуку і-го джерела на робочому місці, дБА.

Рівні звуку прийнято за паспортними даними обладнання-аналогів (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Рівні звуку джерел шуму на робочому місці формувальника

Джерело шуму	L_i, дБА	$10^{0,1Li}$}
Віброплощадка під час ущільнення	98	$6{,}31\cdot10^{9}$
Бетонозмішувач	90	$1{,}00\cdot10^{9}$
Компресор	85	$3{,}16\cdot10^{8}$
Вібродозатор фібри	82	$1{,}58\cdot10^{8}$
Разом	–	$7{,}78\cdot10^{9}$

$$L_\Sigma = 10 \lg (7{,}78\cdot10^{9}) = 98{,}9 \text{ дБА}. \quad (4.2)$$

Сумарний рівень перевищує допустимий на 18,9 дБА, причому визначальним є шум віброплощадки. Установлення віброплощадки на віброізолювальні опори і влаштування звукоізолювального кожуха знижує її шум на робочому місці приблизно на 10 дБА; тоді сумарний рівень

$$L_\Sigma = 10 \lg (10^{8,8} + 10^{9,0} + 10^{8,5} + 10^{8,2}) = 93{,}2 \text{ дБА}. \quad (4.3)$$

Оскільки рівень залишається вищим за 80 дБА, необхідні також протишумні навушники з ефективністю не менше 15 дБА, дистанційне керування віброплощадкою з пульта в звукоізольованій кабіні і обмеження часу безпосереднього перебування біля віброплощадки під час ущільнення.

4.4 Розрахунок повітрообміну в дозувальному відділенні

Під час завантаження цементу і сухих компонентів у дозувальному відділенні виділяється цементний пил; гранично допустима концентрація пилу цементу в повітрі робочої зони – 6 мг/м³. Необхідний повітрообмін

$$L = G / (C_{доп} - C_{пр}), \quad (4.4)$$

де G – інтенсивність пиловиділення, мг/год; $C_{доп}$ – допустима концентрація, мг/м³; $C_{пр}$ – концентрація пилу в припливному повітрі, мг/м³.

Для відділення розміром 6×4×3,5 м (V = 84 м³) за прийнятої інтенсивності пиловиділення G = 2400 мг/год (з урахуванням місцевої аспірації завантажувальних отворів) і $C_{пр}$ = 0,3 мг/м³:

$$L = 2400 / (6{,}0 - 0{,}3) = 421 \text{ м}^3/\text{год}, \quad k = L/V = 421/84 = 5{,}0 \text{ год}^{-1}. \quad (4.5)$$

Природна вентиляція такої кратності не забезпечує, тому передбачається механічна загальнообмінна припливно-витяжна вентиляція продуктивністю не менше 500 м³/год у поєднанні з місцевими відсмоктувачами від завантажувальних люків і бункера фібри.

4.5 Електробезпека

Формувальні цехи заводів ЗБВ належать до приміщень з підвищеною небезпекою, а зони мийки форм і камери тепловологісної обробки – до особливо небезпечних (волога, струмопровідна підлога). Відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98 [24] необхідно:

– заземлювати корпуси бетонозмішувачів, віброплощадок, дозаторів і металеві форми, що встановлюються на віброплощадку;

– живити ручні вібратори через пристрої захисного вимкнення зі струмом спрацювання не більше 30 мА або від мережі зниженої напруги;

– застосовувати ручний електроінструмент класу II або III, перевіряти стан кабелів перед зміною;

– використовувати у вологих зонах світильники з напругою живлення не вище 42 В, а в особливо небезпечних умовах – не вище 12 В;

– проводити вимірювання опору ізоляції і заземлення в строки, встановлені правилами.

4.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях

В умовах воєнного стану підприємство має забезпечити укриття працівників відповідно до ДБН В.2.2-5:2023 [25]. Для заводу ЗБВ це означає:

– наявність захисної споруди або найпростішого укриття, місткість якого відповідає найбільшій працюючій зміні, і позначених маршрутів руху до нього;

– порядок дій за сигналом «Повітряна тривога»: зупинка бетонозмішувачів і віброобладнання, вивантаження або утримання суміші за інструкцією, знеструмлення обладнання, опускання вантажів кранами, евакуація до укриття;

– утримання під'їзних шляхів і проходів вільними від складованих виробів і мішків з фіброю;

– первинні засоби пожежогасіння і аптечки на кожній дільниці.

Підприємства збірного залізобетону можуть також виготовляти елементи для швидкого влаштування захисних споруд. Застосування СФБ для таких виробів доцільне, оскільки дисперсне армування підвищує опір динамічним і ударним впливам, зокрема зменшує відколювання бетону з тильного боку [1].

4.7 Висновки до розділу 4

1. Виробництво виробів зі СФБ зменшує обсяг арматурних робіт і пов'язаних з ними небезпек, але додає специфічні фактори: гострі волокна, шум вібродозаторів, розсипана фібра.

2. Розрахунковий рівень звуку на робочому місці формувальника становить 98,9 дБА; віброізоляція і кожух віброплощадки знижують його до 93,2 дБА, тому необхідні також дистанційне керування і навушники.

3. Для забезпечення допустимої концентрації цементного пилу в дозувальному відділенні необхідний повітрообмін не менше 421 м³/год (кратність 5,0 год$^{-1}$).

4. Сформульовано вимоги електробезпеки та порядок дій працівників у надзвичайних ситуаціях.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі обґрунтовано раціональні склади сталефібробетону для збірних залізобетонних виробів і виконано оцінку техніко-економічної ефективності заміни стрижневого армування дисперсним.

1. Аналіз літератури показав, що головною властивістю СФБ є опір розтягу після утворення тріщини, який характеризується залишковою міцністю за EN 14651 і класом за fib Model Code 2010; Додаток L EN 1992-1-1:2023 створив нормативну основу розрахунку фібробетонних конструкцій. Найдоцільніші сфери застосування СФБ у збірному залізобетоні – сегменти тунелів, труби і кільця, плити малих прольотів.

2. Запропоновано алгоритм оптимізації складу СФБ за критерієм мінімальної вартості з обмеженнями за класом залишкової міцності, технологічністю (RI ≤ 0,6, відстань між волокнами) і статистичною забезпеченістю класу.

3. Методом абсолютних об'ємів розраховано склади СФБ на основі матриці С30/37 з витратою фібри до 50 кг/м³; зі збільшенням вмісту фібри частку піску підвищено з 0,42 до 0,52, а дозування суперпластифікатора – з 0,90 до 1,41 % від маси цементу. Вартість матриці при цьому зростає лише на 1–3 %.

4. Встановлено, що для класів СФБ із літерою с найекономічнішою є фібра 60/0,75 (l/d = 80): для класу 3с потрібно 34 кг/м³, що на 19–24 % дешевше, ніж для фібри 35/0,55 і 50/1,0. Типи фібри слід порівнювати за вартістю на 1 м³ для заданого класу, а не за ціною за кілограм.

5. Моделювання методом Монте-Карло показало, що за серії з 6 зразків і коефіцієнта варіації 20 % детерміністично розрахована витрата фібри підтверджує клас лише з малою ймовірністю; зменшення розкиду залишкової міцності до 15 % є найдієвішим резервом економії фібри.

6. Техніко-економічне порівняння для трьох виробів показало, що СФБ дешевший за залізобетон для кільця колодязя (на 14,4 %) і сегмента тунелю (на 24,7 %), але дорожчий для плити лотка з мінімальним армуванням (на 17,5 %);

трудомісткість армування зменшується в 12–22 рази. Беззбиткова ціна фібри становить 41,7; 98,9 і 115,5 грн/кг відповідно.

7. Аналіз чутливості і моделювання Монте-Карло підтвердили стійкість висновків до зміни цін у межах ±20 %: ефективність СФБ визначається відношенням трудомісткості арматурних робіт до потрібної витрати фібри. Для плит СФБ без арматури доцільний за прольоту до 1,5–1,8 м.

8. Розроблено заходи з охорони праці: розрахунковий рівень шуму на робочому місці формувальника 98,9 дБА потребує віброізоляції віброплощадки, дистанційного керування і засобів індивідуального захисту; необхідний повітрообмін дозувального відділення – не менше 421 м³/год.

9. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальне визначення коефіцієнтів моделі залишкової міцності для фібри і матеріалів, доступних в Україні, та на випробування дослідних виробів навантаженням.

GENERAL CONCLUSIONS

The thesis substantiates rational mix designs of steel fibre reinforced concrete (SFRC) for precast concrete products and evaluates the technical and economic efficiency of replacing conventional reinforcement with fibres.

1. The key property of SFRC is its post-cracking tensile resistance, characterised by the residual flexural strength according to EN 14651 and the class according to the fib Model Code 2010; Annex L of EN 1992-1-1:2023 provides a design basis. The most suitable precast applications are tunnel segments, pipes and rings and short-span slabs.

2. An optimisation algorithm for SFRC mix design is proposed: minimum cost subject to residual strength class, workability (RI ≤ 0.6, fibre spacing) and statistical reliability of the declared class.

3. Mixes based on a C30/37 matrix with up to 50 kg/m³ of fibres were designed by the absolute volume method; the sand fraction was increased from 0.42 to 0.52 and the superplasticizer dosage from 0.90 to 1.41 % of cement mass, which raises the matrix cost by only 1–3 %.

4. For class "c" SFRC, the 60/0.75 fibre (l/d = 80) is the most economical: class 3c requires 34 kg/m³, which is 19–24 % cheaper than with 35/0.55 and 50/1.0 fibres. Fibres should be compared by their cost per cubic metre for a target class, not by price per kilogram.

5. Monte Carlo simulation showed that with six specimens per series and a coefficient of variation of 20 %, the deterministically designed dosage confirms the class with a low probability; reducing the scatter to 15 % is the most effective way to save fibres.

6. For three products, SFRC is cheaper than reinforced concrete for a manhole ring (by 14.4 %) and a tunnel segment (by 24.7 %) but more expensive for a channel cover slab with minimum reinforcement (by 17.5 %); reinforcement labour is reduced 12–22 times. The break-even fibre price is 41.7, 98.9 and 115.5 UAH/kg respectively.

7. Sensitivity analysis and Monte Carlo simulation confirmed that the conclusions are robust to price changes of ±20 %; SFRC efficiency is governed by the ratio of reinforcement labour to the required fibre dosage. Unreinforced SFRC slabs are reasonable for spans up to 1.5–1.8 m.

8. Occupational safety measures were developed: the calculated noise level of 98.9 dBA at the moulding workplace requires vibration isolation of the vibrating table, remote control and personal protection, and the dosing room requires at least 421 m³/h of ventilation.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Vijayan D. S., Sivasuriyan A., Parthiban D., Jakimiuk A., Bayat H., Podlasek A., Vaverková M. D., Koda E. A comprehensive analysis of the use of SFRC in structures and its current state of development in the construction industry. Materials. 2022. Vol. 15, No. 19. Article 7012. DOI: 10.3390/ma15197012.

2. ITA Working Group 2. Guidelines for the design of segmental tunnel linings : ITA Report No. 22. International Tunnelling and Underground Space Association, 2019. URL: https://about.ita-aites.org/files/WG2_-ITA-REPORT-DesignSegment.pdf (дата звернення: 08.09.2026).

3. Innovation for major segmental tunnels. Tunnels and Tunnelling International. URL: https://www.tunnelsandtunnelling.com/analysis/innovation-for-major-segmental-tunnels/ (дата звернення: 03.10.2026).

4. Enhancing precast concrete pipes with steel fiber solutions. Pioneer Concrete Solutions. URL: https://www.pioneerfibre.com/post/enhancing-precast-concrete-pipes-with-steel-fiber-solutions (дата звернення: 22.09.2026).

5. EN 1992-1-1:2023. Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels : CEN, 2023.

6. Thomas J., Ramaswamy A. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 2007. Vol. 19, No. 5. P. 385–392. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(385).

7. Rossi L., Patel R. A., Dehn F. New analytical models to predict the mechanical performance of steel fiber-reinforced alkali-activated concrete. Structural Concrete. 2024. DOI: 10.1002/suco.202301104.

8. Вигнанець М. Тріщиностійкість, деформативність і несуча здатність балкових фібробетонних конструкцій : дис. … д-ра філософії : 192. Одеса : Одеська державна академія будівництва та архітектури, 2024. URL: https://uacademic.info/ua/document/0824U003188 (дата звернення: 11.10.2026).

9. Будівлі та споруди спеціального призначення: матеріали та конструкції : зб. наук. праць. Київ : КНУБА, 2025. URL:

https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/31/V_2025_14.05.25.pdf (дата звернення: 14.09.2026).

10. EN 14889-1:2006. Fibres for concrete – Part 1: Steel fibres – Definitions, specifications and conformity. Brussels : CEN, 2006.

11. Venkateshwaran A., Tan K. H., Li Y. Residual flexural strengths of steel fiber reinforced concrete with multiple hooked-end fibers. Structural Concrete. 2018. Vol. 19, No. 2. DOI: 10.1002/suco.201700030.

12. EN 14651:2005+A1:2007. Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Brussels : CEN, 2007.

13. fib Model Code for Concrete Structures 2010. Berlin : Ernst & Sohn, 2013. 434 p.

14. ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови (EN 206-1:2000, NEQ). Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.

15. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011.

16. Concrete reinforcement comparison. Helix Steel. URL: https://www.helixsteel.com/news/tag/concrete-reinforcement-comparison/ (дата звернення: 17.10.2026).

17. Garcia-Taengua E., Bakhshi M., Ferrara L. Meta-analysis of steel fiber-reinforced concrete mixtures leads to practical mix design methodology. Materials. 2021. Vol. 14, No. 14. Article 3900. DOI: 10.3390/ma14143900.

18. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). Київ : Мінрегіонбуд України, 2009.

19. ДСТУ Б Д.1.1-1:2013. Правила визначення вартості будівництва. Київ : Мінрегіон України, 2014.

20. ДСТУ 3760:2019. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. Київ : УкрНДНЦ, 2019.

21. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12 (дата звернення: 29.10.2026).

22. ДБН А.3.2-2-2009 (НПАОП 45.2-7.02-12). Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012.

23. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України, 1999.

24. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : Держнаглядохоронпраці України, 1998.

25. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Мінрегіон України, 2023.