

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСНОГО
МІКРОАРМУВАННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ**

**THE INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DISPERSED
MICRO-REINFORCEMENT ON PHYSICAL AND
MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE**

**Дробишинець С.Я., к.т.н., доцент, Киричук М.В., аспірант
(Луцький НТУ, м. Луцьк)**

**Drobyshynets S. Y., Ph.D., docent, Kirichuk M.V., postgraduate
student (Lutsk National Technical University, Lutsk)**

У статті описано застосування різного виду фібр для покращення експлуатаційних властивостей будівельних матеріалів. Наведено основні переваги фібробетону над звичайним бетоном. Докладно описано переваги та галузі застосування сталевोї та базальтової фібри. Описано дослідження міцнісних характеристик сталевіфібробетону.

In this article described the use of various types of fibers to improve performance properties of building materials. Described the basic advantages of fiber-reinforced concrete over conventional concrete. In the article proposed the basic properties and performance of various types of fibers. Detailed benefits and the application of steel and basalt fiber. Described research strength characteristics of steelfiberconcrete by various scientists and contains formulas for determining the physical and mechanical characteristics of steelfiberconcrete. The conclusions about the possibility to use of steelfiberconcrete for making various building constructions.

Ключові слова: сталевіфібробетон, фібра, фізико-механічні характеристики.

Keywords: steelfiberconcrete, fiber, the physical and mechanical characteristics.

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

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

Фібробетон - це бетон, армований дисперсними волокнами (фібрами). Такий бетон являє собою звичайну суміш цементу, піску, великого заповнювача та води, доповнену певною кількістю сталевих або інших волокон (фібр). Іноді додається пластифікуюча добавка, щоб поліпшити оброблюваність суміші. Дискретні волокна виробляються з різних матеріалів - від поліпропілену до сталі, в різних конфігураціях, довжинах і поперечних перетинах. (табл. 1).

В даний час найбільша ефективність фібробетону як композиту досягається при правильному підборі і поєднанні компонентів. Найефективнішим матеріалом у цьому плані, не зважаючи на його відносну вартість, є сталева арматура.

Модуль пружності арматури в 56 разів більше аналогічного показника бетону, однак, при звичайному достатньому анкеруванні, в бетоні не може бути повністю використана міцність і отримано найбільший внесок арматури в роботу самого матеріалу як до, так і після утворення тріщин.

При використанні сталевих фібр, проблема з анкеруванням вирішується, так як сталева фібра однаково поширюється по всій площині бетонної матриці, на відміну від анкерування арматури, яка встановлюється в одній площині. Сталева фібра виконує безліч функцій залежно від пропорцій, які можуть варіюватися в межах 25-120 кг/м³. Одна з початкових функцій - зменшення мікро- і макротріщин. Визначаючи тріщини на початковій стадії їх появи, сталева фібра перешкоджає їх поширенню. Традиційна класична арматура, або дротяна сітка, призначена для того, щоб оберегти бетон від утворення найперших усадочних тріщин, а не запобігти їх поширенню.

Багато виробників мають і продають комп'ютерні програми, які дозволяють перераховувати і застосовувати певні пропорції фібри для заміни арматури або арматурної сітки.

Надалі детально розглянемо основні техніко-фізичні показники на прикладі різних фібр. Основним показником вважається тимчасовий опір розриву, або міцність на розтяг.

Основні властивості та показники різних видів волокон наведені нижче в табл. 1.

Залежно від виду матеріалу і способу виготовлення маємо різні значення параметрів і, як наслідок, різні дозування і способи застосування.

Таблиця 1

Основні властивості та показники різних видів волокон

Волокно	Щільність г/см ³	Міцність на розтяг, МПа	Модуль пружності, МПа
Поліпропіленове	0,90	400-700	3500-8000
Поліетиленове	0,95	600-720	1400-4200
Нейлонове	1,10	770-840	2100-2150
Акрилове	1,10	210-420	4900-5100
Поліефірне	1,40	730-780	7000-8000
Бавовняна	1,50	420-700	190 000-210 000
Азбестове	2,60	910-3100	68 000-70 000
Скляне	2,60	1800-3850	7000-8000
Сталеве	7,80	600-3150	190 000-210 000
Вуглецеве	2,00	2000-3500	200 000-250 000
Карбонове	1,63	2000-3500	280 000-380 000

Докладно зупинимося на сталевій і базальтовій фібрі.

Сталева фібра являє собою відрізки сталевих волокон спеціальної форми і довжини, в певних дозуваннях (від 25 кг / м³) додаються в бетонну матрицю для здійснення об'ємного армування.

У результаті фібрового армування створюється композитний матеріал - сталевіфібробетон, що володіє рядом переваг перед неармованим бетоном і бетоном з традиційними видами армування. Зокрема, підвищується:

- міцність на розтяг при згині - в 2-3 рази;
- міцність на стиск - до 10-50%;
- міцність на осьовий розтяг - до 10-40%;
- ударна міцність - в 8-12 разів;
- опір стиранням - до 2 разів;
- тріщиностійкість - в 2-3 рази;
- морозостійкість і водонепроникність - не менше ніж на клас.

Використання технології фібрового армування дозволяє істотно знизити час виконання і трудомісткість робіт за рахунок відмови від в'язки арматури і укладання сіток, а в ряді випадків - заощадити будівельні матеріали за рахунок досягнення проектних характеристик при меншій товщині або металоємності конструкцій.

Перспективні напрямки застосування сталевої фібри:

- у дорожньому будівництві. Підвищена стійкість до тріщиноутворення, утворенню ям і вибоїн, більш рівна поверхня, менша кількість швів і стиків, підвищене шумопоглинання, істотна економія на ремонті;

- злітно-посадкові смуги. Підвищення довговічності, більш рівна поверхня, менша кількість швів і стиків, підвищення безпеки зльотів і посадок, зниження зносу деталей шасі літаків, стійкість до впливів зовнішнього середовища і складних умов експлуатації;

- у мостобудуванні. Підвищення експлуатаційної надійності, зниження трудомісткості за рахунок часткової чи повної відмови від традиційного армування, поліпшення гідроізоляційних властивостей, армування важкодоступних ділянок;

- у гідротехнічних спорудах. Підвищення характеристик міцності, водонепроникності і термінів експлуатації, зниження трудомісткості будівництва;

- виготовлення паль і шпунтів. Застосування паль з оголовком із сталевіфібробетону забезпечує можливість забивання паль до

проектної відмітки без пошкоджень, відпадає необхідність забивання паль-дублерів;

- виготовлення збірних залізобетонних конструкцій. Застосування сталевібробетону в кільцях стінових колодязів, водопропускних і колекторних трубах, плитах перекриттів дозволяє збільшити термін експлуатації виробів при істотному зниженні трудовитрат і економії матеріалів.

Базальтова фібра. Найбільш поширеним є два типи даного матеріалу: мікрофібра і рубане волокно.

Мікрофібра базальтова модифікована (МБМ). МБМ виходить шляхом просочення подрібненої мінеральної вати, виробленої з розплаву базальтових порід. Рекомендований вміст - 1,5-20%, залежно від виду та призначення композиційного матеріалу.

МБМ призначена для дисперсного армування пластмас, бетонів, асфальтобетонів, мінеральних сумішей. З метою поліпшення їх властивостей - міцність на стиск, розтяг, вигин, зріз, водопоглинання, морозостійкість, тріщиностійкість.

Рекомендований вміст мікрофібри - 1,5-20% від маси цементу, в залежності від виду, призначення та вартості композиційного матеріалу.

Методика введення і конкретний вміст мікрофібри в композиті регламентується спеціалізованими інструкціями.

При армуванні мінеральних сумішей і бетонів використовується змішувач примусової дії, причому мікрофібра додається в суху суміш безпосередньо перед додаванням рідких компонентів. Час перемішування - не менше 10 хв.

При армуванні асфальтобетонів і пластмас МБМ додається в розплав матеріалу, і примусове перемішування здійснюється до отримання однорідної маси.

Базальтове рубане волокно. Дана фібра проводиться методом рубки базальтового ровінгу на волокна заданої довжини.

Властивості:

- висока міцність і довговічність;
- висока термостійкість, абсолютна негорючість;
- стійкість до агресивних середовищ;
- екологічна чистота.

Базальтова фібра забезпечує тривимірне зміцнення (традиційна арматура - лише двомірне).

Має наступні сфери застосування:

- зведення об'єктів цивільного будівництва;
- реконструкція сховищ та банківських сейфів;
- спорудження мостів, злітно-посадкових смуг, гідротехнічних споруд (берегових дамб і гребель, шлюзів і каналів річок);
- виготовлення реакторних відділень атомних електростанцій, контейнерів для захоронення радіоактивних відходів;
- зміцнення і ремонт склепінь шахт і тунелів;
- створення різних видів дорожніх покриттів, збірних і монолітних плит, бордюрів, розділових смуг і тротуарної плитки;
- виготовлення деталей об'ємного промислового обладнання.

Розглянемо дослідження міцнісних характеристики сталевібробетону.

Дослідженням сталевібробетону та проблемами широкого його впровадження в будівельну галузь займалися багато як вітчизняних так і закордонних вчених [1,2-5]. Ними отримано ряд експериментальних результатів, які характеризують міцнісні та деформативні властивості дрібнозернистого бетону, сталеві фібри та сталевібробетону. Такі дослідження, як правило, виконувалися паралельно з пошуками ефективних технологічних прийомів виготовлення експериментальних зразків. Незважаючи на деякі відмінності у результатах досліджень, отриманих різними авторами, можна простежити загальні закономірності, що дозволяють оцінити вплив дисперсного армування на властивості бетонів.

До відомих науковців, які займалися вивченням матеріалу, армованого сталевими волокнами, та зробили значний внесок в його впровадження можна віднести: Д.С.Аболіньша, В.В.Білозіра, П.І.Васильєва, І.В.Волкова, Г.В.Гетуна, В.М.Косарева, Б.О.Крилова, О.П.Кричевського, А.Н.Кулікова, Л.Г.Курбатова, Г.Е.Лагутіну, Є.Ф.Лисенка, Е.І.Митрофанова, А.П.Павлова, С.М.Панаріна, Ф.Н.Рабіновича, В.Рамачадрана, А.В.Сакварелідзе, В.І.Соломіна, А.В.Сопільняка, Г.Г.Степанову, О.П.Сунака, Н.Г.Тхань, Р.О.Эйзеншмідта, Батсона, Дж. Бодуена, І. Еджингтона, Ромуальді, Р.Н.Свемі, Д.І.Хананта та інших.

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

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

Гетун Г.В. [5] досліджувала призмову міцність та модуль пружності. Клас бетону матриці при цьому приймав в межах від В15 до В30, фібри використовував діаметром 0,5 мм і 0,3 мм довжиною відповідно 50 та 80 мм. Відсоток армування становив 1...2,2%. Інші науковці для визначення таких характеристик сталеві фібробетону використовували як матрицю дрібнозернистий бетон класу В15 і сталеві фібри діаметром 0,8 мм, довжиною 90 мм з відсотком армування 1...2,5%.

Ряд науковців для визначення кубикової міцності сталеві фібробетону у якості матриці приймали дрібнозернистий бетон класу В10...В25 та різну за розмірами та формою поверхні фібру при різних відсотках об'ємного вмісту фібр.

Сунак О.П. [6] на основі повного факторного експерименту досліджував кубикову та призмову міцність сталеві фібробетону та його модуль пружності. Клас дрібнозернистого бетону матриці приймався В10, В20 та В30, відсоток армування становив 1,5; 2,0 і 2,5 %. При виготовленні зразків використано сталеву фібру з маловуглецевого дроту діаметром 0,3; 0,5; 0,8 мм та довжиною 30, 50, 80 мм відповідно.

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

Для обчислення розрахункового опору сталеві фібробетону на стиск рекомендується залежність [6,7]:

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

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

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

μ_{fv} – коефіцієнт об'ємного армування;

R_f – опір фібр розтяганню;

φ_f – коефіцієнт ефективності фібрового армування, який визначається за формулою

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

де $L = (k_n^2 \mu_{fv} R_f)/R_b$

В дослідженнях вчених [1,6,7] показано, що міцність сталевібробетону на розтяг в 1,5...2 рази більша за міцність бетону матриці, а за даними [8] ця цифра сягає 3,5. Стійкість сталевібробетону до розвитку тріщин при осьовому розтягу в 1,5...2,5 рази вища у порівнянні зі звичайним бетоном та підвищується зі збільшенням об'ємного відсотку армування (μ) і зменшенням діаметра фібр.

Міцність сталевібробетону на розтяг залежить від об'ємного коефіцієнта армування, виду, розмірів і характеру поверхні фібр, класу бетону матриці, а також від геометричних розмірів перерізу елемента. При цьому, розрізняли два випадки руйнування сталевібробетонного елемента: перший – висмикування усіх фібр, другий – розрив і висмикування частини фібр. У першому випадку, при $l_{f,an} > l_f/2$, міцність сталевібробетону на розтяг визначають за формулою [7]:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

η – характеристика зчеплення фібр з бетоном.

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

Слід зазначити, що в умовах короткочасного навантаження [6] граничну стисливість, нижню межу тріщиноутворення та коефіцієнт поперечних деформацій сталевібробетону досліджували

в меншій мірі. У своїх дослідженнях вченими використано різні класи дрібнозернистого бетону-матриці (в межах від В10 до В30), сталеві фібри діаметром від 0,3 до 1 мм, довжиною 30...150 мм. Відсоток фібрового армування змінювався в межах 1,0...2,5 %.

Багато досліджень показало, що при порівнянні із аналогічними показниками бетону-матриці, фіброве армування підвищує кубикову міцність сталевібробетону на 30%, призмову міцність – на 32%, початковий модуль пружності на 20%, граничну стисливість – на 23%, нижню межу тріщиноутворення – на 15% та знижує коефіцієнт поперечних деформацій сталевібробетону – на 12%. Міцність сталевібробетону на осьовий розтяг може бути вища за міцність бетону матриці на 60...100%, а на розтяг при згині – на 140...200% [6,7]. Більш високу міцність сталевібробетону на розтяг при згині можна пояснити тим, що сталеві фібри, які мають більшу густину ніж бетон, осідають під власною вагою, тому нижня розтягнута зона елемента, що працює на згин, буде більше містити фібр.

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

Основним фактором, що забезпечує спільну роботу фібр та матриці є міцність зчеплення фібр з бетоном. Цей фактор залежить, в основному, від сил зчеплення за утворені періодичним профілем виступи фібр, від сил тертя і сил склеювання між фіброю та бетоном, від довжини зони анкерування фібр, а також від марки цементу, водоцементного відношення, орієнтації фібр, віку і класу бетону. У [7] зазначено, що міцність зчеплення фібр з бетоном зростає аналогічно зростанню міцності самого бетону, на протязі перших 28 діб тужавлення. При зменшенні довжини анкерування фібр вдвічі та використанні відпрофільованих фібр, авторами стверджується, що дана міцність зростає в 1,5...2 рази.

З вищенаведеного можна зробити такі висновки:

- сталевібробетон є ефективним композиційним матеріалом, який може широко використовуватись для виготовлення різноманітних конструкцій;

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

Отже, використання дисперсного мікроармування бетону для покращення його фізико-механічних властивостей є актуальним та перспективним на даний час та потребує подальшого наукового дослідження.

1. Аболиньш Д.С., Трейс Ю.Э. Экспериментальное исследование изгибаемых железобетонных элементов, в которых обычный бетон заменен иглобетоном // Расчет и оптимизация строительных конструкций. - Рига: РПИ, 1973. Вып.1. - с. 46-50.

2. Билозир В.В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых сталефибробетонных элементов на фибре из листа: Дис ... канд.Техн.наук: 05.23.01-М., 1991. - 164с.

3. Валовой А.И. Образование и раскрытие трещин в преднапряженных элементах при повторном нагружении // Бетон и железобетон. – 1988.- № 12.- С. 6 – 7.

4. Вылегжанин В.П. Деформации и напряжения при растяжении и чистом изгибе в сталефибробетонных и в сталефиброжелезобетонных элементах после образования в них трещин: Автореф. дис... канд.Техн.наук:05.23.01/-Л., 1984. - 22с.

5. Гетун Г.В. Экспериментально-теоретические исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных в растянутой зоне слоем сталефибробетона: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01.-Киев, 1983. - 180с.

6. Сунак О.П. Прочность, трещиностойкость и деформативность нормальных сечений изгибаемых комбинированно армированных сталефибробетонных элементов: Дис ... канд. техн. наук: 05.23.01.-Киев, 1986. - 175с.

7. Сунак О.П. Сталевібробетонні конструкції: Навч. посібн. - Луцьк: Media, 1999. - 158с.

8. Трамбовецкий Б.П. Бетон, армированный дисперсной арматурой // Бетон и железобетон. -1974. - №2. - с 40-42.