

## НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ З ФІБРОЮ РІЗНОГО ТИПУ

**М. Г. Сур'янінов\*, С. П. Неутов, І. Б. Корнеєва, Д. В. Величко**

Одеська державна академія будівництва та архітектури;  
65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, e-mail: sng@ogasa.org.ua

Подаються результати дослідження несучої здатності фібробетону при дисперсному їх армуванні сталеву фібру трьох різних типів – анкерною, плуценою і хвилястою. У всіх дослідях фібру додавали в кількості 1% за об'ємом, що, як було встановлено в проведених авторами попередніх випробуваннях, є оптимальним відсотком армування. Випробування проводилися на призмах і кубах розмірами 100x100x400 мм і 100x100x100 мм відповідно, витриманих 28 діб. Виготовлено 4 групи призм і кубів. За однією – зі звичайного бетону (з розмірами крупного заповнювача до 10 мм) класу С20/25, і ще по три – з різними типами фібр. Кожна група складалася з шести зразків. Всі випробування проводилися на спеціально підготовленому для цих цілей пресі. На бічні поверхні призм кріпилися індикатори годинникового типу (по одному на кожену призму) для вимірювання поздовжніх деформацій під час завантаження. Навантаження прикладалося однаковими ступенями з витримуванням впродовж 10 хвилин. Результати випробувань подані у вигляді графіків залежностей відносної деформації від напруження і в табличній формі. При випробуваннях кубів фіксувалися лише максимальні навантаження через неможливість стійкого фіксування давачів. Встановлено, що несуча здатність сталеві фібробетону практично не залежить від виду фібри, але її наявність в складі бетону змінює характер руйнування зразка. Замість миттєвого крихкого руйнування спостерігається повільно поточний процес, і призма не розпадається на окремі частини, а залишається єдиним масивом з наскрізними тріщинами; від остаточного руйнування її утримують волокна фібри. Призми з вмістом сталеву фібру витримували навантаження на 11% більше, ніж зразки з бетону. Застосування сталеву фібру покращує не тільки несучу здатність, а й деформативність. Відносна поздовжня деформація сталеві фібробетону в середньому виявилася на 36% вище, ніж у бетону, через наявність у фібробетону псевдопластичної фази деформування.

Ключові слова: фібра, сталеві фібробетон, стиск, призма, куб, несуча здатність, деформативність.

Представлены результаты исследования несущей способности фибробетона при дисперсном армировании стальной фиброй трех разных типов – анкерной, плуценой и волновой. Во всех опытах фибра добавлялась в количестве 1 % по объему, что, как было установлено в проведенных авторами предварительных испытаниях, является оптимальным процентом армирования. Испытания проводились на призмах и кубах, размерами 100x100x400 мм и 100x100x100 мм соответственно, выдержанных 28 суток. Изготовлено по 4 группы призм и кубов. По одной – из обычного бетона (с размерами крупного заполнителя до 10 мм) класса С20/25, и еще по три – с разными типами фибр. Каждая группа состояла из шести образцов. Все испытания проводились на специально подготовленном для этих целей прессе. На боковые поверхности призм крепились индикаторы часового типа (по одному на каждую призму) для измерения продольных деформаций при загрузке. Нагрузка прикладывалась одинаковыми ступенями с выдержкой продолжительностью 10 минут. Результаты испытаний представлены в виде графиков зависимостей относительной деформации от напряжения и в табличной форме. При испытаниях кубов фиксировались лишь максимальные нагрузки из-за невозможности устойчивой фиксации датчиков. Установлено, что несущая способность сталеві фибробетона практически не зависит от вида фибры, но ее наличие в составе бетона меняет характер разрушения образца. Вместо мгновенного хрупкого разрушения наблюдается медленно текущий процесс, и призма не распадается на отдельные части, а остается единым массивом со сквозными трещинами; от окончательного разрушения ее удерживают волокна фибры. Призмы с содержанием стальной фибры выдерживали нагрузки на 11% больше, чем образцы из бетона. Применение стальной фибры улучшает не только несущую способность, но и деформативность. Относительная продольная деформация сталеві фибробетона в среднем оказалась на 36% выше, чем у бетона, из-за наличия у фибробетона псевдопластической фазы деформирования.

Ключевые слова: фибра, сталеві фібробетон, сжатие, призма, куб, несущая способность, деформативность.

The paper presents study results of the load-bearing capacity of fibroconcrete during dispersed reinforcement with steel fiber of three different types - anchor, flattened and corrugated. In all experiments, fiber was added in an amount of 1% by volume, which, as established in the preliminary tests conducted by the authors, is the optimal percentage of reinforcement. The tests were performed on prisms and cubes measuring 100x100x400 mm and 100x100x100 mm, respectively, aged for 28 days. Four groups of prisms and cubes were manufactured. One - from usual concrete (with the sizes of large aggregate to 10 mm) of the C20/25 class, and three more - with different types of fibers. Each group consisted of six samples. All tests were performed on a press specially prepared for this purpose. Clock-type indicators, one for each, were attached to the side surfaces of the prisms to measure longitudinal deformations during loading. The load was applied in equal steps with a holding time of 10 minutes. The test results are presented in the form of graphs of the dependences of the relative deformation on the stress and in tabular form. When testing the cubes, only the maximum loads were recorded, due to the impossibility of stable fixing of sensors. It was found that the load-bearing capacity of steel fiber does not depend on the fiber type, but its presence in the concrete changes the nature of the destruction of the sample. Instead of instantaneous brittle destruction, a slow current process is observed, and the prism does not disintegrate into separate parts, but remains a single array with through cracks; fiber fibers keep it from final destruction. Prisms with steel fiber content withstood loads 11% higher than concrete samples. The use of steel fiber improves not only the load-bearing capacity, but also the deformability. The relative longitudinal deformation of reinforced concrete was on average 36% higher than that of concrete due to the presence of pseudoplastic deformation phase in fibroconcrete.

Keywords: fiber, steel fiber concrete, compression, prism, cube, bearing capacity, deformability.

### Вступ

Вітчизняний і світовий досвід застосування сталевібробетону в будівництві підтвердив його ефективність. Так, наприклад, в Північній Америці сталевібробетон знайшов своє застосування при зведенні морських нафтопереробних гребель і платформ. У Норвегії газопровідний тунель над дном Північного моря і тунель Хеггура зводились армуванням бетону сталевіброю.

З точки зору техніко-економічної ефективності і доцільності використання металевої фібри, найбільш раціональним є її використання при підготовці фундаменту монолітного типу під газову або нафтову бурову установку, при футеруванні стінок нагрівальних і крекінг-печей на заводах, що займаються переробкою нафти, для огорожувальних елементів з теплозахисними властивостями в конструкціях житлового модуля морських нафтогазових платформ.

Використання сталевібро в складі звичайного бетону дозволяє підвищити ефективність залізобетонних виробів за рахунок збільшення міцності бетону на розтяг при згинанні, граничної стисливості, тріщиностійкості, водонепроникності, морозостійкості і корозійної стійкості, опору стиранню.

Дисперсне фіброве армування дозволяє значною мірою компенсувати головні недоліки бетону – низьку міцність на розтяг й крихкість руйнування, а також знижує усадку й повзучість.

Сталевібробетон виготовляється з легкого або важкого бетону. Цей вид бетону отримують армуванням бетонної основи сталевіброю, рівномірно розподіленою в об'ємі бетону. Інте-

гральні властивості фібробетону, як будь-якого композита, обумовлюються властивостями його компонентів (фібри й бетону-матриці), а також наявністю й ступенем їх спільної роботи. У фібробетоні така спільна робота забезпечується за рахунок зчеплення й анкерування фібри в бетоні.

Суттєвою характеристикою сталевібробетону є його пластичність, яка визначається типом фібри, її кількістю і механізмом зчеплення. Крім усього іншого, сталевібробетон добре забезпечує несучу здатність при центральному стиску, що в довгостроковій перспективі дозволить заощадити на трудовитратах і матеріалі при виготовленні конструкцій, що працюють на стиск.

### Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Дослідженнями у сфері фібробетону займається велика кількість вчених. Наприклад, у роботі [1] представлено експериментальне дослідження механічної міцності та довговічності високоміцного бетону зі сталевібро волокна (SFHSC). В експериментальному дослідженні властивості високоміцного бетону із вмістом сталевібро волокна оцінювали за допомогою двох типів режимів затвердіння, звичайного затвердіння водою та гіротермічного затвердіння, при цьому результати випробувань проводили через 7 днів та 7 днів + 24 години. Сталевібро волокна додавали при об'ємних частках 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% та 3,0%. Міцність на стиск і згинання високоміцного бетону із сталевібро волокна досягла максимуму, відповідно, 70,7 МПа та 11,45 МПа, під час нормального затвердіння для об'ємної частки сталевібро во-

локна 3,0%. Експериментальні результати цього дослідження вказують, що додавання сталевих волокон підвищує механічну міцність високоміцного бетону. У статті [2] наголошується, що застосування сталевібробетону призводять до збільшення деформації бетону та зменшення крихкості за рахунок поліпшення властивостей до розтягування та досягнення іншої поведінки після розтріскування. Реакція на пом'якшення деформації досягається завдяки поступовому зачепленню волокна та стійкості до витягування. Реакція на деформаційне зміцнення характеризується збільшенням міцності на розрив за рахунок розвитку тонко розподілених мікротріщин перед локалізацією тріщини (псевдопластична поведінка), що дозволяє використовувати матеріал у нелінійному діапазоні без втрати експлуатаційних характеристик. Результати [3] модельних випробувань конструкції футеровки валу з високоміцного сталевібробетону показали, що тріщиностійкість, ударна в'язкість і несуча здатність конструкції футерування валу були значно поліпшені при нерівномірному навантаженні завдяки заміні звичайного бетону сталевібробетоном, який виявився ідеальним матеріалом для опорних конструкцій шахтних стволів у складних геологічних умовах. Об'єктом статті [4] також є залізобетон із додаванням сталевих волокон (SFRC). Представлено результати випробувань під час пресування зразків бетону з додаванням волокон та без нього за допомогою акустичних та класичних методів. Приймаються три типи зразків: BZ1 (1% волокон), BZ3 (3% волокон) і BZS (без волокон). Додавання сталевих волокон впливає на відношення  $\sigma$ - $\epsilon$  для бетонів при стисненні, а рівень критичних напружень  $\sigma_{cr}$  зростає разом із зростанням кількості сталевих волокон, доданих до бетонної суміші. В роботі [5] проводиться порівняння поведінки сталевібробетону з раціональним вмістом фібри і його матриці – дрібнозернистого високоміцного бетону при стисканні. В результаті випробувань підтверджений ефект «обойми» при введенні в матрицю бетону сталевібробетону – зниження поперечних деформацій, підвищення тріщиностійкості. Характер руйнування також змінюється і стає більш плавним. Досліджено [6] два типи сталевібробетону (прямі та гачкові волокна) з різним вмістом волокон при одновісному стисканні та розтягуванні. Результати показали, що волокна помітно покращили якість бетону після розтріскування, що проявлялось у досягненні більш високої пластичності, залишкової міцності та в'язкості при стиску та розтягуванні. Дані, зібрані в цьому дослідженні, та дані з

існуючих публікацій використовувались для оцінки впливу сталевих волокон на різні основні параметри сталевібробетону за допомогою тестів статистичних гіпотез. Статистично було очевидно, що межа міцності при розтягуванні та деформація при піковому навантаженні при стиску або розтягуванні позитивно корелюють з відсотком армування волокнами. Інші дослідження [7-11], що також присвячені аналізу міцності та деформативності сталевібробетону, показують підвищення характеристик бетону при додаванні сталевібробетону, але рекомендації щодо її оптимальної форми недостатні або взагалі відсутні. Таким чином, питання дослідження механічних властивостей сталевібробетону з додаванням сталевібробетону різної форми продовжує залишатися актуальним.

**Мега роботи** полягала у дослідженні поліпшення несучої здатності на стиск бетону з додаванням сталевібробетону різної форми.

#### **Матеріали та методи дослідження**

Всі дослідження проводилися на базі лабораторії кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури. Для виготовлення зразків під час замішування бетонної маси рівномірно додавалася фібра, загальний обсяг якої становив 1% від об'єму самого виробу. Цей обсяг був визначений як найбільш оптимальний в ході попередніх досліджень [12]. Випробування проводилися на призмах і кубах розмірами 100x100x400 мм і 100x100x100 мм відповідно, витриманих 28 доби. Призми і куби виготовлені згідно з нормативними документами [13]. Виготовлено по 4 групи призм і кубів: по одній – зі звичайного бетону (з розмірами великого заповнювача до 10 мм) класу C20/25, і ще по три – з різними типами фібри (анкерна, плющена і хвиляста). Кожна група складалася із шести зразків.

Фібра, використана для досліджень, була надана підприємством ПАТ ВО «Стальканат Сігур» і виконана відповідно до вимог Європейського стандарту.



**Рисунок 1 – Види фібр:  
анкерна, плющена, хвиляста**



*а – призма до випробувань; б – загальний вигляд призми зі вмістом фібри після випробувань; в – тріщина у призмі зі вмістом фібри*

**Рисунок 2 – Призма у процесі випробувань**

Всі випробування проводилися на спеціально підготовленому для цих цілей пресі. Під час випробувань на стиск зразки кубів і призм встановлювали обраною гранню на нижню опорну плиту преса центрально щодо його поздовжньої осі. Між плитами преса і його опорними поверхнями зразків допускається прокладання сталеві плитки. Після встановлення зразка на опорну плиту преса, зміщала верхня плита преса з верхньої опорної гранню елемента таким чином, щоб їх площини повністю прилягали одна до одної. Після цього їх завантажували.

На бічні поверхні призм кріпилися індикатори годинникового типу (по одному на кожен призму) для вимірювання поздовжніх деформацій під час завантаження. Для зручності кріплення індикаторів до зразків були виготовлені дві рамки по меншому перетину призми. Паралельно до граней призм розташовувалися стрижні, що впиралися в пристрої. Саме завдяки зміні у поведінці цих стрижнів ідентично паралельним їм гранях, можемо судити про відносні деформації, що виникали в призмах.

Для вимірювання поздовжніх деформацій використовувалися датчики годинникового типу із ціною розподілу 0,001 мм і базою 25 см.

Лабораторні випробування призм проводилися за однаковою програмою згідно [13, 14], навантаження прикладалися однаковими ступенями з витримкою тривалістю 10 хвилин.

Лабораторні випробування кубів проводилися аналогічно даними призмам, за винятком відстеження поздовжніх деформацій на кожному етапі завантаження і, як наслідок, фіксації

лише максимального витриманого зразком навантаження, через неможливість стійкої фіксації датчика.

#### **Результати дослідження та їх обговорення**

Таким чином, було випробувано на стиск до руйнування 24 призми – по шість у кожній серії, самих серій 4, вони відрізнялись наповненням та виготовлялися з однієї матриці. Як відомо з літературних джерел, результати, отримані різними авторами при схожих випробуваннях, найчастіше суттєво відрізняються. Тому всі зразки були випробувані протягом однієї доби, що принаймні забезпечило однаковий температурно-вологісний режим експериментів.

В межах серії розкид показників виявився дуже малим, тому немає сенсу збільшувати кількість зразків у серії. Автори отримали збільшення несучої здатності на стиск призм зі вмістом сталеві фібри 11%, що виходить за рамки похибки, бо середнє руйнівне навантаження для призм з бетону – 221 кН, а зі сталеві фібробетону – 245 кН. При однаковому відсотку армування несуча здатність сталеві фібробетону, як виявилось, майже не залежить від форми фібрового волокна, але наявність фібри у складі бетону змінює характер руйнування зразка (рис. 2). Замість миттєвого крихкого руйнування маємо уповільнений процес, та призма не розпадається на окремі частини, а залишається єдиним масивом з наскрізними тріщинами. Від остаточного руйнування її утримують волокна фібри (рис. 2, в)

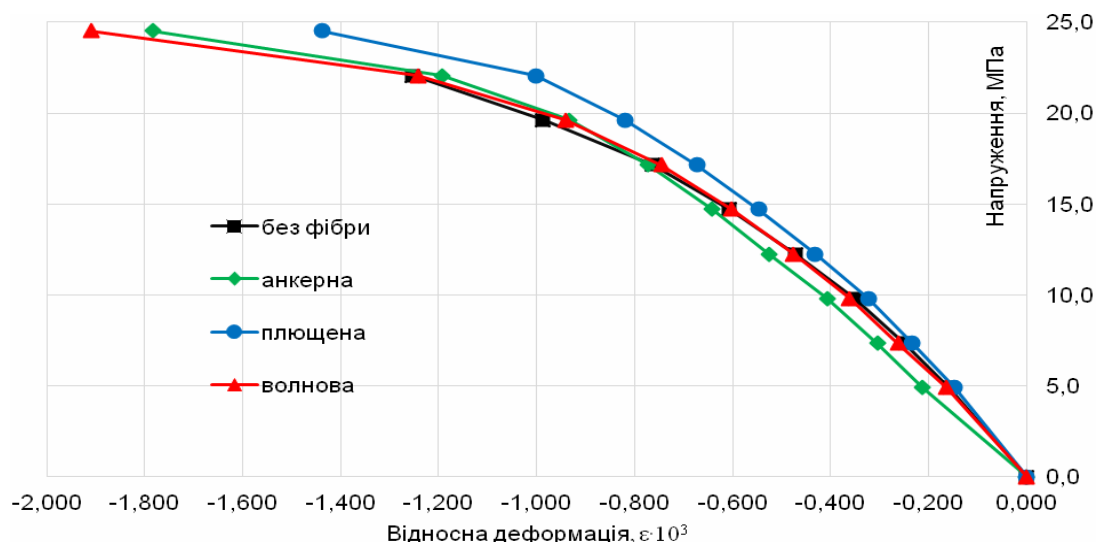


Рисунок 3 – Залежність деформації від напруження при стиску призм бетонних та сталевібробетонних зі вмістом різних фібр

Поведінку кожного з видів призм під час проведення випробувань можна відстежити за графіком залежностей на рис. 3. Очевидно, що до появи мікротріщин всі графіки зливаються, різниця між ними майже непомітна, тож немає сенсу приводити їх окремо чи по серіях, і на рис. 3 показані середні значення. Коли несуча здатність бетонної матриці вичерпана, графік для серії з бетону обривається, бо зразки розколюються, чого не відбувається зі сталевібробетонними призмами, у них тріщини розкриваються повільно, що дає їм можливість витримати ще один ступінь навантаження. При цьому кут нахилу графіків збільшується.

Більш розгорнуті результати випробувань наведені у табл. 1.

**Висновки**

Таким чином, встановлено, що несуча здатність сталевібробетону при стиску практично не залежить від виду фібри, але її наявність у складі бетону міняє характер руйнування зразка. Замість миттєвого крихкого руйнування спостерігається повільно поточний процес, і призма не розпадається на окремі частини, а залишається єдиним масивом з наскрізними тріщинами: від остаточного руйнування її втримують волокна фібри. Призми зі сталевібробетоном витримували навантаження на 11% більше, ніж зразки з бетону. Застосування сталевібробетону поліпшує не тільки несучу здатність, а й деформативність. Відносна поздовжня деформація сталевібробетону в середньому виявилася на 36% вищою, ніж у бетону через наявність у фібробетону псевдопластичної фази деформування.

Таблиця 1 – Результати випробувань призм

Матеріал	Зразок	Руйнівне навантаження, кН	Відносна деформація · 10 <sup>3</sup>	
Бетон	1	245	-1,26	
	2	196	-1,25	
	3	196	-1,27	
	4	221	-1,24	
	5	221	-1,28	
	6	245	-1,23	
Сталевібробетон	анкерна	1	245	-1,81
		2	245	-1,76
		3	245	-1,78
		4	245	-1,77
		5	245	-1,78
		6	245	-1,79
	плющена	1	245	-1,44
		2	245	-1,43
		3	245	-1,45
		4	245	-1,46
		5	245	-1,44
		6	245	-1,44
	хвиляста	1	245	-1,93
		2	245	-1,92
		3	221	-1,88
		4	245	-1,89
		5	265	-1,91
		6	245	-1,91

## Література

1. G. Velayutham, C.B. Cheah. The Effects of Steel Fibre on the Mechanical Strength and Durability of Steel Fibre Reinforced High Strength Concrete (SFRHSC) Subjected to Normal and Hydrothermal Curing. Penang, EDP Sciences, 2014.  
[https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2014/01/mateconf\\_bust2013\\_02004.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2014/01/mateconf_bust2013_02004.pdf)
2. T.E.T. Buttignol, J.L.A.O. Sousa, T.N. Bitencourt, Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPRFC): a review of material properties and design procedures. São Paulo, Rev. IBRACON Estrut. Mater, vol.10, no.4, 2017.  
[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-41952017000400957&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952017000400957&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
3. Mechanical Properties of High-Performance Steel-Fibre-Reinforced Concrete and Its Application in Underground Mine Engineering / Xiang Li and others. Materials (Basel), 2019.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6696420/>
4. Tomasz Błaszczyszki, Marta Przybylska-Fałek. Steel Fibre Reinforced Concrete as a Structural Material. Poznan, Procedia Engineering, vol. 122, 2015, p. 282.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815031264>
5. Степанов М. В., Моисеенко Г. А., Диаграммы деформирования мелкозернистого высокопрочного бетона и высокопрочного сталефибробетона при сжатии. Москва, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, 2019.  
<http://oreluniver.ru/public/file/archive/2073-7416-2019-83-3-11-21.pdf>
6. Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension / Xijun Shi and others. Construction and Building Materials, vol. 233, 10. 2020.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819327680>
7. Seong-Cheol Lee, Joung-Hwan Oh, Jae-Yeol Cho, Compressive Behavior of Fiber-Reinforced Concrete with End-Hooked Steel Fibers. Materials (Basel), 2015.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5507035/>
8. A Study On The Compressive & Flexural Strength Behavior Of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam / Nafissa Tabassum and others. International Journal of Advanced Research, 2018.  
<http://www.ijournalijar.com/article/24741/a-study-on-the-compressive-&-flexural-strength-behavior-of-steel-fiber-reinforced-concrete-beam/>
9. Comparison of material properties of steel fiber reinforced concrete with two types of steel fiber / Z. Marcalíková and others. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 549, 2019.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/549/1/012039/pdf>
10. Reza Babaie, Milad Abolfazli, Ahmad Fahimifar, Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, vol. 28, issue 1, 2019.  
<https://www.degruyter.com/view/journals/jmbm/28/1/article-p119.xml?language=en>
11. Гафарова Н.Е. Фибробетон для монолитного строительства // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 3-1. – С. 11  
<https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11389>
12. Неутов С.Ф., Бояджи А.А., Корнеева И.Б. Определение основных физико-механических характеристик сталефибробетонной смеси оптимального состава. World science, Warsaw, Poland. № 5 (33), vol. 2, may 2018, p. 26-30.  
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34924627>
13. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. ДСТУ Б.В.2.7-214:2009. – [чинний від 2009-12-22]. К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с. (Національний стандарт України).
14. BS EN 14845-2:2006 Test methods for fibers in concrete - Part 2: Effect on concrete.

## References

1. G. Velayutham, C.B. Cheah. The Effects of Steel Fibre on the Mechanical Strength and Durability of Steel Fibre Reinforced High Strength Concrete (SFRHSC) Subjected to Normal and Hydrothermal Curing. Penang, EDP Sciences, 2014.  
[https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2014/01/mateconf\\_bust2013\\_02004.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2014/01/mateconf_bust2013_02004.pdf)
2. T.E.T. Buttignol, J.L.A.O. Sousa, T.N. Bitencourt, Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPRFC): a review of material properties and design procedures. São Paulo, Rev. IBRACON Estrut. Mater, vol.10, no.4, 2017.  
[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-41952017000400957&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952017000400957&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
3. Mechanical Properties of High-Performance Steel-Fibre-Reinforced Concrete and Its Application in Underground Mine Engineering / Xiang Li and others. Materials (Basel), 2019.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6696420/>

4. Tomasz Błaszczczyński, Marta Przybylska-Fałek. Steel Fibre Reinforced Concrete as a Structural Material. Poznan, Procedia Engineering, vol. 122, 2015, p. 282.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815031264>
5. Stepanov MV, Moiseenko GA, Diagrams of deformation of fine-grained high-strength concrete and high-strength steel-fiber concrete under compression. Moscow, Research Institute of Building Physics, RAASN, 2019. [in Russian]  
<http://oreluniver.ru/public/file/archive/2073-7416-2019-83-3-11-21.pdf>
6. Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension / Xijun Shi and others. Construction and Building Materials, vol. 233, 10. 2020.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819327680>
7. Seong-Cheol Lee, Joung-Hwan Oh, Jae-Yeol Cho, Compressive Behavior of Fiber-Reinforced Concrete with End-Hooked Steel Fibers. *Materials (Basel)*, 2015.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5507035/>
8. A Study On The Compressive & Flexural Strength Behavior Of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam / Nafissa Tabassum and others. *International Journal of Advanced Research*, 2018.  
<http://www.journalijar.com/article/24741/a-study-on-the-compressive-&-flexural-strength-behavior-of-steel-fiber-reinforced-concrete-beam/>
9. Comparison of material properties of steel fiber reinforced concrete with two types of steel fiber / Z. Marcalíková and others. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 549, 2019.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/549/1/012039/pdf>
10. Reza Babaie, Milad Abolfazli, Ahmad Fahimifar, Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, vol. 28, issue 1, 2019.  
<https://www.degruyter.com/view/journals/jmbm/28/1/article-p119.xml?language=en>
11. Gafarova N.Ye. Fiber concrete for monolithic construction. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017. No. 3-1. P. 11.  
<https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11389>
12. Neutov S.F., Boyadzhi A.A., Korneeva I.B. Opređenje osnovnyh fiziko-mehaničeskikh karakteristik stalefibrobetonnoj smesi optimalnogo sostava. *World science*, Warsaw, Poland. No 5 (33), vol. 2, may 2018, P. 26-30. [in Russian]  
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34924627>
13. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrol'nymy zrazkamy. DSTU B.V.2.7-214: 2009 [chynnyy vid 2009-12-22]. K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2010. [in Ukrainian]
14. BS EN 14845-2:2006 Test methods for fibers in concrete - Part 2: Effect on concrete.