

Дмитро АНОПКО,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-2585-2512

Ольга БОНДАРЕНКО,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-8164-6473

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ

З підвищенням міцності бетону росте і його крихкість, знижуються пластично-деформаційні властивості при короточасному й тривалому навантаженні, що приводить практично до миттєвого руйнування бетону при досягненні ним граничного стану. Варіантом вирішення цієї задачі можна вважати дисперсне армування бетону фіброю, що дозволяє істотно підвищити його питому міцність особливо на розтяг і згин, тріщиностійкість, стійкість до ударних і вібраційних впливів, опір стиранню тощо. До дисперсно-армованих бетонів або фібробетонів належить група композиційних матеріалів, що включають короткі відрізки різних волокон (фібри) у цементній матриці. В якості фібри можуть служити різні типи волокон зі сталі, скла, синтетичних матеріалів, азбесту, вуглецю та ін. Найбільш поширені фібробетони на портландцементі, армовані сталевим волокном – сталеві фібробетони. Поверхня фібр може бути профільована, оброблена травленням і, як виключення, гладкою. Кількість фібр, що вводиться в бетон, у більшості випадків коливається від 0,5 до 2% по об'єму. За своїми властивостями міцності виробу, виготовлені з використанням дрібнозернистого фібро-бетону (футеровані труби, відводи, трійники, хрестовини, жолоби), витримують навантаження, що значно перевищують 5 МПа і тому можуть широко застосовуватися для захисту обладнання від абразивного зносу, впливу агресивних середовищ і високих температур, що підтверджується багаторічною практикою експлуатації таких виробів в різних галузях промисловості, забезпечуючи збільшення терміну служби обладнання в 2...6 разів. Випробування дослідних зразків футерованих труб показали, що їх надійність і довговічність в напірних і гравітаційних трубопровідних системах підвищується в 5...10 разів в порівнянні з електрозварювальними сталевими трубами і в 2...3 рази в порівнянні з високолегованими і біметалевими трубами.

Ключові слова: високоміцний бетон, покриття, зносостійкість, захист, стираність.

Актуальність теми дослідження. Сучасне будівництво має чітку тенденцію до підвищення поверховості будинків і споруд, що, безумовно, вимагає застосування нових ефективних матеріалів. Одним з них є фібробетон, який дозволяє поліпшити такі характеристики бетону, як тріщиностійкість, морозостійкість, міцність на розтяг, згин, крутіння та тощо. Як відомо, твердіння бетонів супроводжується усадковими явищами, що виникають у процесі фізико-хімічних перетворень. Ці явища характерні для бетонних сумішей високих марок по рухливості і без застосування запобіжних заходів супроводжуються розтріскуванням з боку

поверхні, що випаровується. Пластична усадка розвивається протягом перших 4...6 годин після укладання та ущільнення бетонної суміші за умови того, що буде можливість випаровування води із свіжоукладеного бетону. Деформації можуть сягати 2...3 мм/м.кв. Ведення фібри у певному співвідношенні сприяє суттєвому зменшенню величини усадки і тим самим запобігає розтріскуванню бетону та конструкцій. Поява пластичної усадки неприпустима, оскільки вона веде до катастрофічного та незворотного погіршення всіх властивостей. Численні випробування бетонних зразків із застосуванням фібри показали, що міцність на розтяг при згині збільшується до 35% залежно від виду бетону та кількості фібри, що особливо актуально при виготовленні бетонних та монолітних плит перекриття. Використання фібри у складі бетону дозволяє зменшити утворення тріщин при усадці до 70%, підвищити міцність бетону на розтяг при вигині до 35%, знизити зношування поверхні до 52%, підвищити морозостійкість до 30%, підвищити водонепроникність до 40%, підвищити ударну в'язкість, запобігти розширюванню бетонної суміші.

Постановка проблеми. В сучасному будівництві все ширше застосовують фібробетон, для якого характерні підвищені значення міцності на розтяг, ударо- та вібростійкість, низька стираність та ряд інших покращених фізико-механічних властивостей. На даний час запропонована велика кількість видів фібри, яка відрізняється властивостями матеріалу та геометричними параметрами. В Україні поширені стальна фібра, виготовлена із низьковуглецевої сталі, а також базальтова фібра. Дрібнозернистий фібробетон використовується в оздоблювальних роботах, дорожньому будівництві та для створення архітектурних елементів завдяки своїй гладкій поверхні та високій міцності. Він також застосовується для гідроізоляційних та звукоізоляційних покриттів, а у високоармованих конструкціях і спорудах із тонким захисним шаром. Фібра підвищує міцність, ударну стійкість, вологостійкість та морозостійкість, а також зменшує ризик утворення тріщин. Для визначення можливості зниження витрат матеріальних та енергетичних ресурсів на виготовлення фібробетону із заданими властивостями досліджено також ефективність застосування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В даний час в напірних і гравітаційних трубопровідних системах для гідралічного транспортування абразивних матеріалів (шламів, пульпи, клінкеру, гірських порід, шлаків, золи і т.д.) з фракцією до 4 мм і швидкістю руху до 30 м/с використовуються поздовжні електрозварні сталеві труби. Ці труби мають низьку міцність і надійність в експлуатації. В якості матеріалів захисту можуть використовуватися: полімерні покриття, гумові вироби, чавунні плити, кам'яне литво, шамотна цегла, а також спеціальні бетони [1...3].

При проектуванні захисту необхідно враховувати розмір частинок матеріалу, що транспортується, швидкість повітря, тиск, наявність рідини. Механізми абразивного зношування реалізуються у випадку, коли абразивні частинки вступають в контакт із поверхнею металевої деталі по дотичній. Абразивні частинки пружно деформують метал, залишаючись цілими або руйнуються. Залежно від структури абразивного матеріалу і середовища абразивні зерна можуть вбиратися цим середовищем, чи відбиватися, або навіть виходити з контакту. Абразивна частка втирається в метал деталі, якщо вона має більшу твердість і міцність, у порівнянні з металевою поверхнею. Втиснена частка при русі відносно поверхні може дряпати або зрізати мікроскопічну стружку. Різання може початися тільки при певному відношенні глибини проникнення абразиву до радіусу

закруглення його граней. Розрізняють гідро-абразивне зношування загальне і місцеве [2...6].

Інтенсивність залежить від якості зношуваного матеріалу, розміру, форми, твердості, густини твердих часток гідросуміші, її концентрації, корозійної активності рідкого середовища, швидкості переміщення часток відносно поверхні, що зношується, кута набігання часток на поверхню та інших умов. Засоби зменшення гідро абразивного зносу полягають у застосуванні зносостійких матеріалів, зменшенні швидкості гідросуміші, використанні певних технічних і конструктивних рішень. Найкращі результати в збільшенні терміну служби і надійності дають сталеві труби, футеровані дрібнозернистим фібро-бетоном [7...13].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка і дослідження властивостей захисних покриттів на основі високоміцних бетонів.

Основна частина. На основі розробленого композитного цементу були призначені склади дрібнозернистих бетонів і досліджені наступні властивості: міцність на розтяг при стиску, згині, розтягу, водопоглинання, водонепроникність, морозостійкість, зносостійкість, міцність анкерування арматури в бетоні, міцність і деформативність композиту при дії як короткочасного так і довготривалого навантаження. Склади бетону наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Склади бетону на основі кальцінованого бокситу і композитного цементу

№ п/п	Склади бетону, мас. %	Співвідношення в'яз. / зап.	Середня густина, кг/м ³
1	Композитний цемент – 65 Кальцінований боксит (0,08...0,16мм) – 35	2:1	2150
2	Композитний цемент – 50 Кальцінований боксит (0,08...0,16мм) – 50	1:1	2350
3	Композитний цемент – 35 Кальцінований боксит (0,08...0,16мм) – 65	1:2	2640
4	Композитний цемент – 35 Кальцінований боксит (0,8...2,5мм) – 65	1:2	2710
5	Композитний цемент – 50 Кальцінований боксит (0,8...2,5мм) – 50	1:1	2420

Міцність анкерування арматури в бетоні визначали на кубках 15×15×15 см із використанням арматури періодичного профілю Ø10 мм, а також на кубках 7,07×7,07×7,07 см з використанням гладкої арматури Ø6 мм. Результати випробувань наведено у табл. 2.

Аналізуючи дані, наведені в табл. 2, можна зробити висновок, що найбільш ефективним є застосування в розроблених зносостійких бетонах арматури періодичного профілю. Так, зчеплення бетону з такою арматурою на 1,5...33% вище, ніж у зразка (склад 5). Порівняння значень зчеплення гладкої арматури з еталонним та досліджуваними бетонами показує, що вони приблизно однакові та знаходяться в межах похибки випробувань. Крім лабораторних були проведені натурні випробування зчеплення арматури анкетування та захисного шару футеровки. Для цього були виготовлені експериментальні зразки футеровки різного анкерного кріплення (рис. 1). Зразок номер 1, точкове анкетування окремими закладними деталями з відстанню між ними 40...50 см, що були виготовлені з

металевого дроту Вр-1, діам. 6 мм. Другий зразок виготовлений з армуванням металевою сіткою, що виготовлена з металевого дроту Вр-1, діам. 6 мм, та закріплена до металевого листа електрозваркою з кроком 25...30 см. Третій варіант зразка це просічно-витяжний лист, який був закріплений до металевого листа з таким самим кроком. Після цього був нанесений на кожен зі зразків дрібнозернистий фібро-бетон на основі композитного цементу та кальціонованого бокситу шаром 50 мм. Після набуття бетоном проектної міцності зразки піддавалися випробуванню, шляхом нанесення по футерованій поверхні ударів кувалдою вагою 5 кг і фіксувалися час та кількість ударів до появи перших тріщин та відшарувань.

Таблиця 2

Міцність зчеплення бетонів з арматурою

Склад бетону за табл. 1	Міцність зчеплення арматури з бетоном, МПа	
	гладкого профілю	періодичного профілю
1	4,55	4,92
2	4,2	5,16
3	4,6	більше 6,45
4	4,66	5,17
5	4,4	4,85

Випробування бетонів на водонепроникність показало, що вони відповідають марці по водонепроникності W6. Результати випробувань розроблених бетонів на морозостійкість показали марку по морозостійкості F 200, що свідчить про їхню високу довговічність.

Результати випробувань на водопоглинання досліджуваних бетонів показали, що водопоглинання бетонів 1...5 складів знаходиться в межах 6..9%. Введення суперпластифікатора також сприяє зменшенню водопоглинання бетону.



Рис. 1. Експериментальні зразки анкерування бетонної футеровки до металу

Міцність бетонів досліджували відповідно як на зразках природного тверднення, так і після ТВО. Режим тепловологої обробки бетонів був 2+8+2 год при температурі ізотермічної витримки 60°C. Після тепловологої обробки бетон

витримували в нормальних умовах до досягнення ним віку 28 діб. Аналіз даних табл. 3-4 показав, що встановлені закономірності при аналізі кубикової та призмної міцності збігаються з відомими в літературі. Кубикова і призмна міцності зразків бетонів, які не піддавалися тепловологісній обробці, трохи вище міцності матеріалів, які її пройшли. Співвідношення між призмною та кубиковою міцностями становить 0,64...0,70. Модуль пружності досліджуваних бетонів, визначали за методикою, наведеною в [7-13]. Результати випробувань, наведені в табл. 3-4.

З наведених результатів можна зробити висновок, що застосування менш дисперсного заповнювача призводить до підвищення модуля пружності бетону в порівнянні з модулем пружності бетонів на пилоподібному кальцинованому бокситі. Це пояснюється вищою дисперсністю пилу, що призводить до підвищення водопотреби суміші, і як наслідок до підвищення В/Ц.

Таблиця 3

**Середня густина, міцність та модуль пружності бетонів природного
тверднення**

Склад бетону за табл. 1	Середня густина, кг/м ³	Міцність бетону, МПа,		Співвідношення $R_k/R_{пр}$	Модуль пружності, МПа
		кубікова (R_k)	призмна ($R_{пр}$)		
1	2150	130	87	0,67	26500
2	2350	120	85	0,65	25000
3	2640	135	87	0,65	29000
4	2710	137	95	0,7	38500
5	2420	137	105	0,76	63000

Таблиця 4

Середня густина, міцність та модуль пружності бетонів після тепловологісної обробки

Склад бетону за табл. 1	Середня густина бетону, кг/м ³	Міцність бетону, МПа,		Співвідношення $R_k/R_{пр}$	Модуль пружності, МПа
		кубікова (R_k)	призмна ($R_{пр}$)		
1	2150	130	87	0,67	24500
2	2350	117	75	0,64	23500
3	2640	132	87	0,66	28000
4	2710	135	92	0,69	37500
5	2420	135	92	0,69	37500

Розроблені зносостійкі бетони мають дещо знижену гнучкість у порівнянні зі звичайними важкими бетонами. Знижений модуль пружності позитивно впливає на експлуатаційні характеристики бетону при динамічних навантаженнях. Тепловологісна обробка теж дещо знижує модуль пружності бетону, що також властиво для важких бетонів.

Випробуванню піддавалися фрагменти футерованої труби шаром високоміцного фібро-бетону товщ. 50 мм. Після набуття бетоном проектної міцності, труби випробовували на міцність скиданням з висоти 2, 4, 6 та 8 м на бетонну підлогу та фіксували цілісність футеровки та появу тріщин.

Методика випробовувань труб футерованих фібро-бетоном показана на рис. 2.



Рис. 2. Випробовування на міцність фрагментів труб футерованих фібро-бетоном

В результаті випробувань було встановлено при скиданні з висоти 2 та 4 метри тріщини та відшарування відсутні. При скиданні з висоти 6 та 8 метрів присутні тріщини в шарі футеровки та часткове відшарування в зразку номер 1 з точковим анкетуванням закладними деталями. Найкращий результат показав зразок номер 3 з армуванням просічко-витяжним листом (рис. 3).



Рис. 3. Відшарування та деформація захисного покриття фрагментів труб футерованих фібро-бетоном

На сьогоднішній день фібро-бетон є високоефективним конструкційним матеріалом, властивості якого можна контролювати в досить великих межах і використовувати як матеріал захисту. Технологія отримання якісних поліфункціональних фібро-бетонів нового покоління широко застосовується в Європі. Такі бетони називаються «високофункціональними бетонами», тобто бетонами, які самоущільнюються (High Performance Concrete) [7].

Збільшення якісних показників фібро-бетону в порівнянні зі звичайним бетоном визначається наступними показниками: збільшення міцності на розтяг – в 2,5 рази; збільшення ударної в'язкості – в 10 разів; стійкість до розтріскування – в 5...6 разів; в'язкість при досягненні міцності на розтяг – в 10...20 разів; стійкість до стираності – в 2 рази.

Терміни експлуатації технологічного обладнання з фібро-бетонною футеровкою показані в табл. 5.

Таблиця 5

Терміни експлуатації футерованих та металевих труб

Вид виробництва, характеристика породи	Термін експлуатації металевої труби, років	Термін експлуатації труби з фібро-бетонною футеровкою, років
Високоабразивна алмазна руда (кімберліт)	0,5...1,0	4...5
Залізна руда та її шлами	1...2,5	9...10
Кварцові піски	1...2	6...7
Мідно-цинкові сполуки	1...2	7...8
Золи ТЕС	1...2	15...20

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, у результаті експериментальних досліджень встановлено, що за своїми властивостями міцності вироби, виготовлені з використанням дрібнозернистого фібро-бетону (футеровані труби, відводи, трійники, хрестовини, жолоби), витримують навантаження, що значно перевищують 5 МПа і тому можуть широко застосовуватися для захисту обладнання від абразивного зносу, впливу агресивних середовищ і високих температур, що підтверджується багаторічною практикою експлуатації таких виробів в різних галузях промисловості, забезпечуючи збільшення терміну служби обладнання в 2...6 разів. Випробування дослідних зразків футерованих труб показали, що їх надійність і довговічність в напірних і гравітаційних трубопровідних системах підвищується в 5...10 разів в порівнянні з електрозварювальними сталевими трубами і в 2...3 рази в порівнянні з високолегованими і біметалевими трубами

Список літератури:

1. Желібо Є.П. Основи технологій виробництва в галузях народного господарства / Є.П. Желібо, Д.В. Анопко, В.М. Буслик, М.А. Овраменко Київ: Кондор. 2005. 716 с.
2. Світлий Ю.Г., Білецький В.С. Гідравлічний транспорт: монографія. Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, «Редакція гірничої енциклопедії». 2009. 436 с.
3. Світлий Ю.Г., Круть О.А. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів. Донецьк: Східний видавничий дім. 2010. 268 с.

4. Martinella R. Selection and application of wear-resistant materials to increase service life of components. *Ceramics International*. 1993. Vol. 19. №6.
5. Huthings I.M. Wear-resistant materials: into the next century. *Materials Science and Engineering*. 1994. Vol. 184. №2.
6. Fischer A. Well-founded selection of materials for improved wear resistance. *Wear*. 1996. Vol. 194. №1-2.
7. Yoo D.-Y., Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 73. P. 267-280.
8. ДСТУ 9208:2022 Бетони важкі. Технічні умови. [Чинний від 2023-09-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2022. 32 с.
9. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсно-армованого бетону. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2016. 28 с.
10. ДСТУ Б В.2.6-2:2009 Конструкції будинків і споруд. Вироби бетонні і залізобетонні. Загальні технічні умови. [Чинний від 2010-10-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2010. 24 с.
11. ДСТУ 2643-94 Труби сталеві та чавунні. Терміни та визначення. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 1995. 20 с.
12. ДСТУ 2823-94 Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 1996. 33 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-212:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стираності. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2010. 20 с.

Dmitriy ANOPKO, Olga BONDARENKO

Protective coatings based on high-strength concrete

As the strength of concrete increases, its fragility also increases, and its plastic deformation properties decrease under short-term and long-term loading, which leads to almost instantaneous destruction of concrete when it reaches its limit state. A solution to this problem can be considered dispersed reinforcement of concrete with fiber, which allows to significantly increase its specific strength, especially in tension and bending, crack resistance, resistance to shock and vibration effects, resistance to abrasion, etc. Dispersed reinforced concretes or fiber concretes include a group of composite materials that include short segments of various fibers (fibers) in a cement matrix. Different types of fibers made of steel, glass, synthetic materials, asbestos, carbon, etc. can serve as fibers. The most common fiber concretes based on Portland cement, reinforced with steel fiber - steel fiber concretes. The surface of the fibers can be profiled, etched and, as an exception, smooth. The amount of fibers introduced into the concrete in most cases ranges from 0.5 to 2% by volume. According to their strength properties, products made using fine-grained fiber concrete (lined pipes, bends, tees, crosses, gutters) withstand loads significantly exceeding 5 MPa and therefore can be widely used to protect equipment from abrasive wear, the effects of aggressive environments and high temperatures, which is confirmed by many years of experience in operating such products in various industries, ensuring an increase in the service life of equipment by 2...6 times. Testing of prototypes of lined pipes showed that their reliability and durability in pressure and gravity pipeline systems increases by 5...10 times compared to electric-welded steel pipes and by 2...3 times compared to high-alloy and bimetallic pipes.

Keywords: *wood, veneer, thermal modification, modification efficiency, waterproofing, durability of wood.*