

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

НАЛИВАЙКО ТЕТЯНА ТАРАСІВНА

УДК 691.328.43

**ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ СКЛОФІБРОБЕТОНУ ШЛЯХОМ
ІНТЕНСИВНОГО ПРОСОЧЕННЯ КОМПАУНДОМ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Казімагомедов Ібрагім Емірчубанович
Харківський національний університет будівництва та архітектури, доцент кафедри будівельні матеріали і вироби

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Саницький Мирослав Андрійович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри будівельного виробництва

доктор технічних наук, професор
Плугін Дмитро Артурович,
Український державний університет залізничного транспорту, професор кафедри будівельні матеріали, конструкції та споруди

Захист відбудеться «05» грудня 2019 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.056.04 Харківського національного університету будівництва та архітектури за адресою: 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету будівництва та архітектури за адресою: 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40 та на сайті університету <http://www.kstuca.kharkov.ua>

Автореферат розісланий «04» листопада 2019 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради,
канд. техн. наук, доц.

О. В. Доброходова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Застосування дисперсно-армованих композитів надає істотні переваги у порівнянні з традиційними матеріалами щодо подолання головної проблеми бетонів - недостатньої міцності на розтяг та необхідності у економніших, легших та довговічніших конструкціях. Дисперсне армування скловолокном є найбільш ефективним методом підвищення міцності бетонів, оскільки міцність склофібри перевищує міцність природних і більшості синтетичних волокон. Модуль пружності скловолокна схожий на модуль пружності сталі, а з об'ємної ваги - у 3,5 рази легше та приблизно вдвічі вище модуля пружності бетону, отже значну частину прикладених напруг сприймають скловолокна.

Головний стримувальний фактор широкого застосування склофібри - низька корозійна стійкість волокон до впливу лужного середовища гідратуючих цементів ($\text{pH}=12-14$). Корозія відбувається при проникненні у пори бетону вологи. Виникнення пор при твердінні цементного в'язучого неминує, при введенні у бетон 35-50% води, тільки 15% міцно приєднуються до новоутворень, залишок - 22-37% створюють пори: гелеві розміром 1 нм (10-6мм) і капілярні - 100 нм (10-4мм). При таких розмірах пори мають особливість фізичних дій: стінки пор сприяють виникненню капілярного ефекту, тому дрібнопориста структура «втягує» вологу в середину виробу, другий фізичний ефект - це конденсація з повітря пари, яка відкладається на стінках капілярів як шари води. Структура цементного каменю сприяє наповненню водою її середовища, а з часом лужною водою. В звичайному бетоні скловолокно завжди контактуватиме з лужним середовищем, отже довговічність склофібробетону обмежена.

Істотне поліпшення міцності склофібробетону можливе завдяки флюатації - просоченню пористого тіла цементного каменю компаундом на основі рідкого скла з додаванням нанокремнезему та кремнефтористого натрію в якості затверджувача. При флюатації виділяється кремнієва кислота та утворюються плівки малорозчинного CaF_2 , які ущільнюють тверднучу систему та захищають скловолокно у лужному середовищі. Рідке скло реагує з оксидом кальцію таким чином, що призводить до появи низькоосновних гідросилікатів кальцію та лужних гідроалюмосилікатів групи цеолітів. Останні спочатку виникають в субмікросталічному стані, який з часом змінюється в напрямку кристалізації стабільних фаз. Присутність в розчині порового простору їдкого лугу блокує перехід іону кальцію в розчин, що пояснює відсутність вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в складі новоутворень. Розчинність низькоосновних гідросилікатів кальцію становить 0,035 – 0,05 г/см³, розчинність лужних гідроалюмосилікатів ще менша. У структурі фібробетону відбувається заповнення пор частками гелю і продуктами його взаємодії, що сприяє значному підвищенню щільності і водонепроникності композиту.

Процес просочення пор бетону використовуваними режимами є тривалим (≈ 10 годин) та призводить до заповнення пор тільки на 50-55%. З метою скорочення термінів і підвищення повноти просочення майже на 100% у пропонованому дослідженні використано інтенсивний режим на основі вакуумування, який полягає в

тому, що склофібробетон занурюється у компаунд при збереженні досягнутого вакууму у поровому просторі. У цьому випадку виникає перепад тиску, атмосферне повітря тисне на повітря у порах і забезпечує заповнення компаундом простору між волокнами. Таке технологічне рішення захистить капіляри від проникнення води, а волокнисті наповнювачі - від руйнування в лужному середовищі та допоможе виробляти вироби із склофібробетону з тривалішим терміном експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в межах держбюджетної науково-дослідницької роботи «Розробка матеріалів та технологій для захисту від корозії підземних інженерних комунікацій» на кафедрі будівельних матеріалів і виробів Харківського національного університету будівництва та архітектури МОН України (державний реєстраційний номер 0118U003494, термін виконання: 2019 р.).

Мета і задачі дослідження. *Метою* дисертаційної роботи є поліпшення фізико-механічних показників склофібробетону шляхом інтенсивного просочення компаундом складу: рідке скло, нанодисперсний кремнезем, кремнефторид натрію.

Для досягнення зазначеної мети визначені наступні основні **задачі**:

- знайти ефективне дозування скловолокна у складі склофібробетону;
- розробити ефективний склад компаунду для флюотації склофібробетону;
- визначити корозійну стійкість скловолокна у лужному середовищі склофібробетону при просоченні розробленим компаундом;
- дослідним шляхом визначити технологічний прийом введення затверджувача в просочувальну рідину для досягнення необхідної в'язкості компаунду;
- визначити фізико-механічні показники склофібробетонних зразків з використанням інтенсивного просочення компаундом: міцність на стиск та на згин, морозостійкість, водопоглинання, усадочні деформації;
- розробити технологічну схему виробництва склофібробетонних виробів;
- надати техніко-економічне обґрунтування ефективності виробництва просоченого склофібробетону.

Об'єкт дослідження - процес просочення порового простору склофібробетону рідким компаундом, який затвердіває після заповнення пор.

Предмет дослідження - склофібробетон, удосконалений шляхом інтенсивного просочення компаундом пористої матриці цементного каменю.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження виконувалися з використанням методів планування експерименту. Фізико-механічні дослідження проведені згідно з нормативними стандартними методами визначення міцності, водопоглинання, деформацій усадки та повзучості, густини і морозостійкості будівельних матеріалів і виробів. Визначення фазового складу цементного каменю і мікроструктури матеріалів виконано методами фізико-хімічного аналізу: інфрачервоної спектроскопії, електронної мікроскопії.

Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше:

- встановлено, що шляхом інтенсивного просочення склофібробетону рідким компаундом досягається підвищення міцності на стиск на 36,5%, міцності на розтяг

на 66,7%, зменшення водопоглинання з 4,8% до 1,3%, збільшення морозостійкості з 150 до 400 циклів;

- теоретично обґрунтовано й експериментально підтверджено, що інтенсивний режим просочення склофібробетону рідким компаундом шляхом вакуумування призводить до прискорення процесу просочення, сприяє заповненню пористого простору та збільшенню корозійної стійкості фібри, завдяки утворенню гідросилікату кальцію;
- показана залежність міцності фібробетонів, які просочені рідким компаундом від виду волокон армування (базальтові, вуглецеві, скловолокна) та інтенсивності просочення.

Набуло подальшого розвитку:

- просочення фібробетонних виробів компаундом, що твердіє, із застосуванням інтенсивного режиму.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено універсальну технологічну схему виробництва виробів малих архітектурних форм з просоченого склофібробетону;
- розроблено ефективний склад склофібробетону: скловолокно діаметром 10-13 мкм, довжиною 13-15 мм – 4%; нанокремнезем – 0,8% від маси цементу; В/Ц=0,45; цемент – 550 кг/м³; пісок – 1375 кг/м³, що забезпечує підвищення міцності склофібробетону на 52%;
- запропоновані рішення випробувано і впроваджено на ТОВ «БК ТИТАНІУМ» (м. Харків), випущено партію (50 од.) облицювальних склофібробетонних панелей, отримано економічний ефект від застосування просоченого склофібробетону, який складає 397,77 грн. за 1 м³ бетону;
- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри будівельних матеріалів та виробів ХНУБА при підготовці фахівців за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Особистий внесок здобувача. Усі наукові ідеї, викладені у дисертації, авторські: вивчення стану проблеми; обґрунтування шляхів збільшення корозійної стійкості скловолокна у складі фібробетону за допомогою флюатування; обґрунтування ефективного складу склофібробетону з підвищеною міцністю; вивчення фізико-механічних властивостей отриманого склофібробетону; аналіз результатів фізико-хімічних досліджень складу і мікроструктури склофіброцементу; розробка технологічної схеми виробництва облицювальних панелей з просоченого склофібробетону. Здобувач брала участь у впровадженні у виробництво дослідно-промислової партії. Внесок співавторів спільних публікацій полягає в участі в експериментальних дослідженнях та підготовці отриманих результатів до опублікування.

Апробація результатів дослідження. Основні результати досліджень доповідалися на: 6-й Міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві», м. Харків, ХНУБА, 2016 р., 8-й Міжнародній науковій конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд», м. Харків, ХНУБА, 2017 р., 73-й Науково-технічній конференції, м. Харків, ХНУБА, 2018 р., 7-й Міжнародній

науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», м. Харків, УкрДУЗТ, 2018 р., 9-й Міжнародній конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд», м. Харків, ХНУБА, 2019 р., 5-й Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і методи будівельного матеріалознавства», м. Харків, ХНУБА, 2019 р.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 13 друкованих працях, з них: 7 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, з них 3 статті у збірках, що увійшли до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory); 6 праць апробаційного характеру.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 180 сторінок. Дисертація містить 43 рисунки, 23 таблиці, 4 додатки. Список використаних джерел містить 173 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, висвітлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету і завдання дослідження; визначено об'єкт і предмет досліджень, зазначено методи досліджень, наукова новизна отриманих результатів та практичне значення; виокремлено особистий внесок здобувача; схарактеризовано структуру і обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналітичний огляд літератури з питань застосовуваних методів підвищення міцності дисперсно-армованих бетонів. Дослідженнями з теорії та практики виробництва фібробетонів займалися такі вчені, як: Вилегжанін В. П., Гетун Г. В., Косарев В. М., Курбатов Л. Г., Лисенко Е. Ф., Лобанов І. А., Плугін Д. А., Рабінович Ф. Н., Романов В. П., Саницький М. А., Янкелович Ф. Ц. та ін., а також ряд закордонних дослідників: Beddar M., Nicolson J. F., Swamy R. N. та інші. Опрацьована література надає можливість представити досить повну картину сучасного стану технологій виробництва дисперсно-армованих матеріалів, у тому числі склофіробетонів. Дисперсне армування компенсує головні недоліки звичайного бетону – низький опір розтягуванню і крихкість руйнування. Як підтверджують дослідження, міцність на розтяг при згині підвищується у 2 рази в порівнянні зі звичайним бетоном, стійкість до ударних навантажень у 4,5 разів, стирання у 1,8 рази. Зазначене є однією з найважливіших характеристик фібробетонів.

Проведений аналіз досліджень довів, що волокна незалежно від хімічного складу взаємодіють з рідкою фазою гідратуючих цементів. Цементостійкі волокна містять значну кількість дорогих компонентів (оксидів цирконію, цинку, бору, титану), тому вартість їх висока. Отже, виникла необхідність дослідження методів, які інтенсифікують корозійну стійкість нелугостійкого доступного скловолкна в цементній матриці завдяки флюатації компаундом, що затвердіває.

У **другому розділі** схарактеризовано вихідні матеріали і обґрунтовано прийняті методи досліджень. Як в'язучий матеріал використано портландцемент

марки ПЦ 1-500 Н виробництва ПАТ «Євроцемент-Україна» (Ц); як заповнювач - пісок кварцовий Безлюдівського кар'єру з модулем крупності 1,31 мм (П). Водоцементне співвідношення В/Ц=0,45. У дослідженні застосовано скловолокну (СВ), виготовлене з алюмоборосилікатного скла типу Е щільністю 2540 кг/м³, модулем пружності 72,4 ГПа. Для армування використано скловолокну діаметром 13 мкм, у кількості - 4% за об'ємом, довжиною волокон - 15 мм. Як наповнювач застосовано нанокремнезем Ковелос-05 (НК) з вмістом 99% аморфного кремнезему в кількості 0,8% від маси цементу з середнім розміром часток 53 нм.

Просочувальним компаундом слугувало найбільш стійке до гідротермальної деструкції, недороге і нетоксичне в порівнянні з бітумами, метилметакрилатами та сіркою рідке натрієве скло (Na_2SiO_2) з силікатним модулем близьким до трьох із додаванням кремнефтористого натрію (Na_2SiF_6) та нанокремнезему. Реакції між компонентами компаунда характеризуються колоїдно - адсорбційним процесом, при якому відбувається випадінням об'ємного колоїдного осаду SiO_2 та здебільшого залежать від поглинання реагуючих компонентів колоїдним осадом. Для уникнення реакції відразу після перемішування та досягнення необхідної каучукової консистенції рідини при розробці компаунду використано технологічний прийом: порошок кремнефториду натрію попередньо розчиняється з водою (7%) при температурі 95-100⁰С та додається до водного розчину рідкого скла (50%), підігрітого до 60⁰С. З часом компаунд перетворюється в пастоподібну масу, затвердіває, стає механічно міцнішим.

Для повного просочення капілярно-пористих тіл застосований режим інтенсивного просочення, при якому виріб вакуумується до стабільного залишкового тиску 0,05-10 мм рт.ст. за допомогою вакуум-насоса.

Експериментальні методи досліджень обрано з урахуванням специфічних умов експлуатації розроблених композицій. Так, для вирішення поставлених задач застосовуються методи, які сприяють вивченню поверхневих властивостей матеріалів, встановленню фізико-механічних показників.

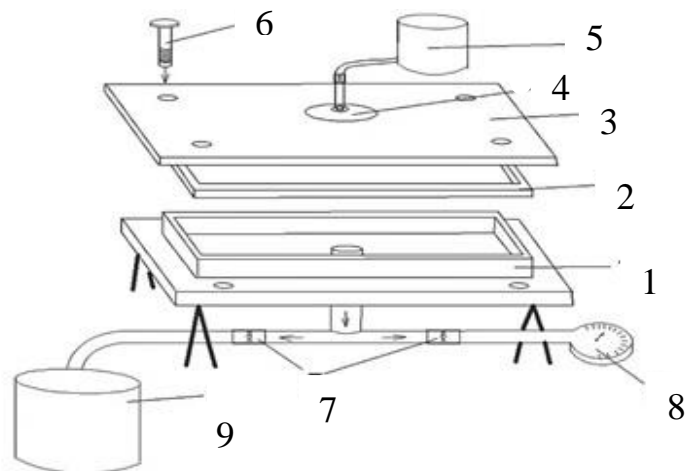


Рис. 1. Просочувальна установка: 1 – металевий корпус (для бетонної балки 40×40×160 мм); 2 – гумова прокладка верхньої камери; 3 – пластина з оргскла (кришка

корпусу); 4 – впускний штуцер для просочувального компаунда; 5 – ємність з компаундом; 6 – болти для герметизації; 7 – двоходовий кран; 8 – вакуумметр; 9 – вакуумний насос.

У **третьому розділі** розглянуто теоретичні основи підвищення міцності дисперсно-армованих матеріалів та досліджено необхідні показники армуючого матеріалу. Важливим напрямом, що істотно поліпшує властивості дисперсно-армованих бетонів, є збільшення міцності зчеплення армуючих волокон з матрицею бетону.

Проведено порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей найбільш поширених волокнистих матеріалів. Модуль пружності скловолокнистих матеріалів наближений до сталі, а по щільності в 3,5 рази легше та приблизно втричі перевищує модуль пружності бетону. Вартість вуглецевих та базальтових волокон значно перевищує вартість сталевих і скляних волокон, тому використання їх в якості арматури потребує спеціального обґрунтування. Модуль пружності поліпропіленових волокон становить не більше 1/4 модуля пружності звичайних бетонів. Це зумовлює вагомі можливості застосування скляних волокон як ефективний армуючий матеріал.

Але армування скляними волокнами спричинило істотні труднощі, пов'язані, перш за все, з їхньою низькою лугостійкістю, та як наслідок - низькою довговічністю армованих такими волокнами композиційних матеріалів. Дослідження процесів, що відбуваються при взаємодії твердіючого цементу з волокном, надають можливість обрати ефективний захист скляного волокна в цементній матриці при розробці склоцементних композицій. Аналіз проведених досліджень показав (рис. 2), що навіть спеціальні цементостійкі волокна, які містять значну кількість дорогих компонентів - оксидів цирконію, цинку, бору, титану - незалежно від хімічного складу, вступають у взаємодію з рідкою фазою гідратуючих цементів. В цілому захищені скловолокна виявляють корозійну стійкість в $\text{Ca}(\text{OH})_2$ розчині в перші 8-16 днів травлення, але протягом часу відбувається відділення корозійного шару разом з покриттям.

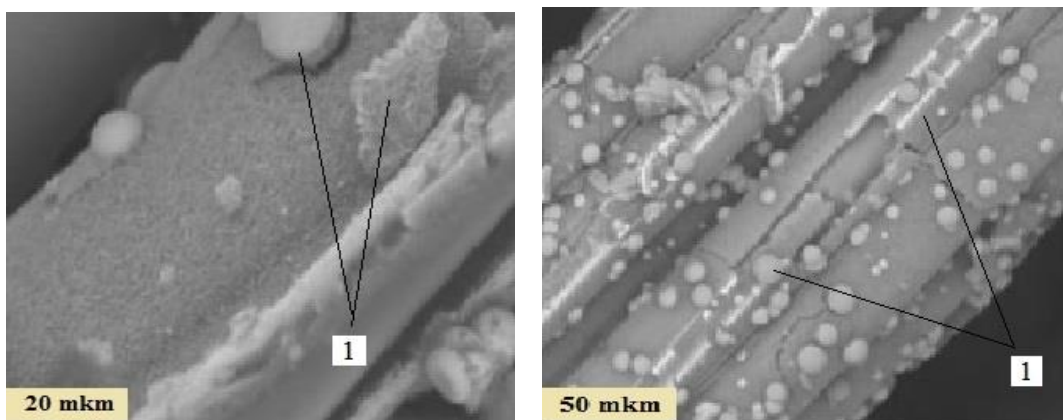


Рис. 2 - Електронна мікроскопія (ЕМ) скловолокна з цирконієвим покриттям після травлення в насиченого розчині $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 1 – ділянки корозії та розтріскування покриття

З метою захисту від корозії скловолокна безпосередньо в лужному середовищі цементу і зменшення відкритої пористості бетону досліджено просочення склофібробетону з додаванням до складу нанокремнезему Ковелос-05.

Спільне введення скловолокна і нанокремнезему призводить до збільшення міцності бетону на 51% при вмісті СВ - 4%, НК - 0,8% (рис. 3).

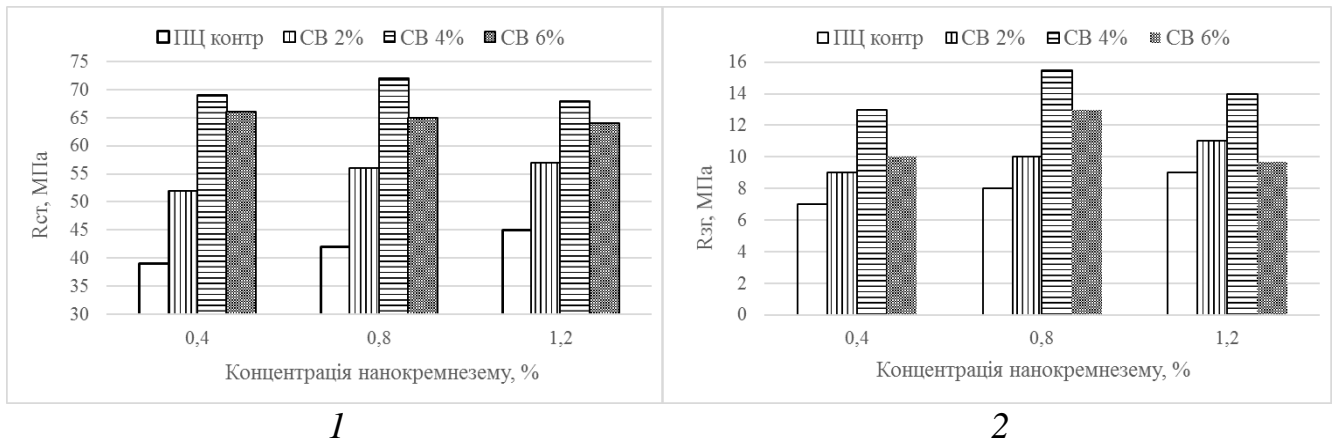


Рис. 3 - Вплив концентрації нанокремнезему і скловолокна на 1 - міцність склофібробетону на стиск; 2 – міцність склофібробетону на згин.

Завдяки розвиненій питомій поверхні та підвищеній хімічній активності нанокремнезем запобігає корозії скловолокна. Це призводить до збільшення міцності цементного каменю і посилення армуючого ефекту скловолокна.

Дослідження застосовуваних видів просочення (рис. 4) виявили, що при капілярному просоченні (рис. 4, а) підйом рідини залежить від радіусу пор. При повному зануренні (рис. 4, б) відбувається защемлення повітря в центрі порового простору. При односторонній подачі під тиском заповнюється тільки 60–70% пористого простору. Окрім того, просочення при тиску триває кілька годин (5-6 год.).

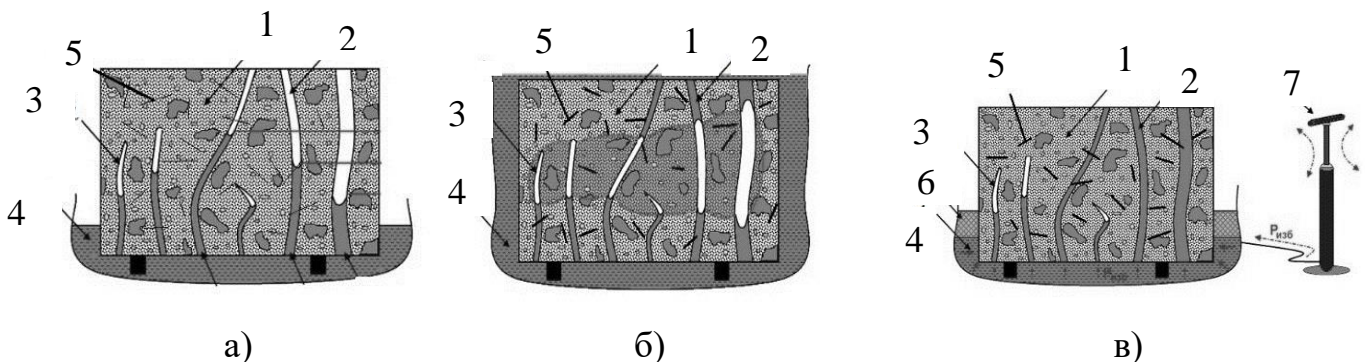


Рис. 4 - Види просочення: а) капілярне просочення; б) повне занурення; в) одностороння подача компаунду під тиском: 1 – бетонний виріб; 2 – наскрізний капіляр; 3 – тупиковий капіляр; 4 – просочувальний компаунд, 5 – волокна, 6 – гідроізоляція, 7– насос

Встановлено, що процес заповнення фібробетону компаундом, який затвердіває характеризується наявністю двох сил (рис. 5): рушійна сила (P_{mv}) і реактивна сила (P_R).

Досягнення повноти і прискорення темпу просочення можливе за умови видалення повітря з капілярно-пористого тіла. Попереднє вакуумування не призвело до значного підвищення темпу і повноти просочення. Деаеровані вироби знову швидко заповнювалися повітрям. Для повного просочення капілярно-пористих тіл розроблено режим просочення, при якому виріб, що просочується піддається вакуумобробці. Для цього застосовують поршневі вакуум-насоси або вдосконалені ротаційні двоступеневі насоси. Рух компаунду по капіляру відбувається під дією рушійної сили (P_{mv}), яка при атмосферному тиску (P_a) відповідає йому, тобто $P_{mv} = P_a$.

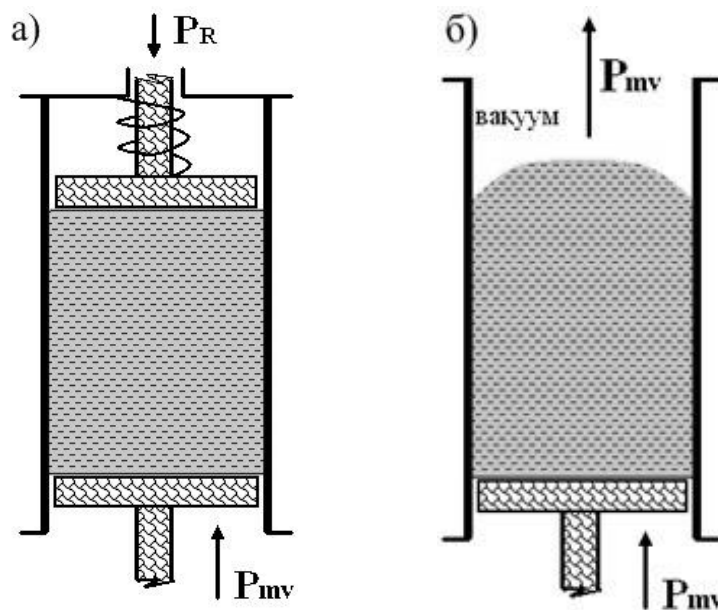


Рис. 5 - Фізична модель процесу просочення капіляра: а) при повному зануренні тіла в компаунд; б) при вакуумованому тілі, зануреному у компаунд

Для проведення просочення за інтенсивним режимом використовувалась лабораторна просочувальна установка, розроблена на кафедрі БМіВ ХНУБА. Це конструкція з камерою, в якій створюється вакуум, і передбачена можливість проводити просочення при надмірному тиску, що прискорює повноту і швидкість просочення. Основною особливістю інтенсивного режиму просочення є умова, згідно з якою після відкачування повітря, виріб занурюється в просочувальний компаунд таким чином, щоб в ньому зберігся досягнутий вакуум, а все тіло оточувала навколишня рідина.

Для здійснення експериментальних досліджень створені бетонні балочки $4 \times 4 \times 16$ см, пошарово армовані волокном та ущільнені на вібростолі. Після затвердіння в нормальних умовах протягом 28 діб зразки просочувались.

Перший етап - в герметичній камері розміщується склофібробетонний зразок. Другий етап - вакуум насос створює в герметичній камері розрідження, яке контролюється вакуумметром. Досягнувши повної дегазації зразка, необхідно

перекрити кульової кран для ізоляції вакуумметра від компаунда. Третій етап - в момент закінчення вакуумування через впускний штуцер подається просочувальний компаунд.

Деаерація тривала близько 1 хв., просочення компаундом - 5-10 хв.

У **розділі 4** проведено експериментальне дослідження склофібробетонних зразків, які флюатувалися розробленим компаундом.

Експеримент з вивчення показників міцності бетону, армованого волокнами, проводився в три етапи:

- перший етап - дослідження впливу дозування і довжини скловолокна на міцність бетону;
- другий етап - вивчення корозійної стійкості волокна;
- третій етап - вивчення впливу інтенсивного просочення на міцність склофібробетону на згин, розтяг, модуль пружності, водопоглинання, морозостійкість.

Аналіз результатів експериментів з вивчення впливу різних доз і довжин скловолокна довів, що найкращі показники характерні для бетонних зразків, що мають у складі скловолокно в кількості 4% при довжині волокон 15мм. При цьому, спостережено підвищення міцності на стиск з $R_{ct} = 52$ МПа до 71 МПа, міцність на згин з $R_{зг} = 9$ МПа до 15 МПа (рис. 6).

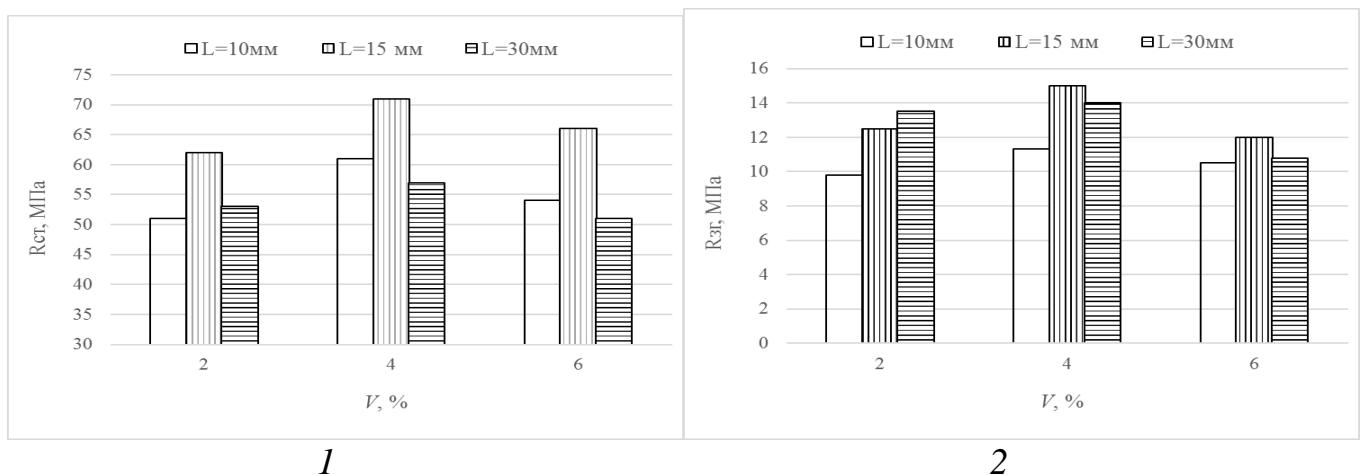


Рис. 6 - Залежність між міцністю бетону та дозуванням і довжиною фібри: 1 – міцність на стиск, 2 – міцність на згин.

Для порівняльного аналізу досліджено фізико-механічні характеристики просочених рідким склом бетонних зразків з базальтовим, вуглецевим і скловолокном при розробленому інтенсивному режимі на просочувальному обладнанні ХНУБА (табл. 2). Дозування волокон складо 4% від маси цементу, довжина - 15 мм.

Таблиця 2

Характеристики досліджених бетонних зразків (4×4×16), армованих різними волокнами і просочених рідким склом при інтенсивному режимі

Бетонні зразки (4×4×16см)	Матеріал армування, V=4%, L= 15 мм	Міцність на згин, R _u ,МПа	Міцність на стиск, R _b ,МПа	Водопоглинання, %
Непросочені	Скловолокно	7,86	42,89	5,5
	Базальтове волокно	8,51	52,50	5,7
	Вуглецеве волокно	9,84	56,13	5,4
Просочені	Скловолокно	14,53	70,21	1,3
	Базальтове волокно	15,48	72,94	1,2
	Вуглецеве волокно	16,2	73,33	1,0

З урахуванням результатів, отриманих протягом експерименту, встановлено позитивний вплив просочення фібробетонів з різним видом армуючого волокна. Усі отримані фібробетонні зразки характеризуються підвищенням міцності на стиск та згин.

Так, міцність на стиск фібробетону, армованого вуглецевим та базальтовим волокнами, збільшилася відповідно на 64% і 82%. Водопоглинання базальтофібробетону зменшилось до 1,2 %, фібробетону з вуглецевими волокнами до 1,0%, що характеризує повноту просочення композиційних матеріалів.

При оптимізації складу склофібробетону варіювався вміст скловолокна, нанокремнезему та рідкого скла (табл. 3).

Таблиця 3

Оптимальний склад склофібробетону, зміцненого інтенсивним режимом просочення

Витрати матеріалів на 1 м ³ бетону, кг						Водопоглинання, %	Морозостійкість, цикли
Портланд-цемент, кг	Пісок, кг	В/Ц	Скловолокно, % від маси цементу	Нанокремнезем, % від маси цементу	Рідке скло, кг		
550	1375	0,4	0	0	0	4,8	150
			2	0,8	110	1,80	250
			4			1,30	400
			6			1,75	200

При варіюванні кількості в'язучого у складі склофібробетону можна відзначити, що при витраті 550 кг/м^3 отримано максимальні характеристики склофібробетону відповідно класу міцності В45. При витраті портландцементу 500 кг/м^3 та 450 кг/м^3 фізико-механічні характеристики бетону знижуються на 15-20% і 25-35% відповідно. Варіювання щільності армування скловолокном впливає на зміну водопоглинання і морозостійкості бетону. Збільшення відсотка армування до рівня 4% призводить до формування високощільної структури армованого скловолокном бетону.

Для візуалізації повноти просочення склофібробетону в просочувальний компаунд додано люмінесцентний препарат - родамін 6Ж. Після висушування зразки просвічувалися під ультрафіолетовою лампою. Результати досліджень свідчать, що досягнуто 95% заповнення порового простору, що підвищує щільність і міцність композиту. Варто зазначити, що структура склофібробетону після просочення показала стійку тенденцію створення міцного єдиного конгломерату.

Як підтверджено дослідженнями поздовжніх і поперечних зрізів модельних зразків, отриманих при просочуванні з подальшим їх затвердінням, спостерігається проникнення твердіючого компаунда в мікро- і макродефекти скловолокон із заповненням усього об'єму (рис. 7).

У поперечному зрізі склофібробетонного зразка видно вкриті суцільною полімерною плівкою волокна з характерними горбистими заповненнями нерівностей на поверхні волокон і рівномірним їх розподілом в матеріалі. Поздовжній зріз показує утворення на поверхні волокон плівки, товщиною менше 1 мкм.

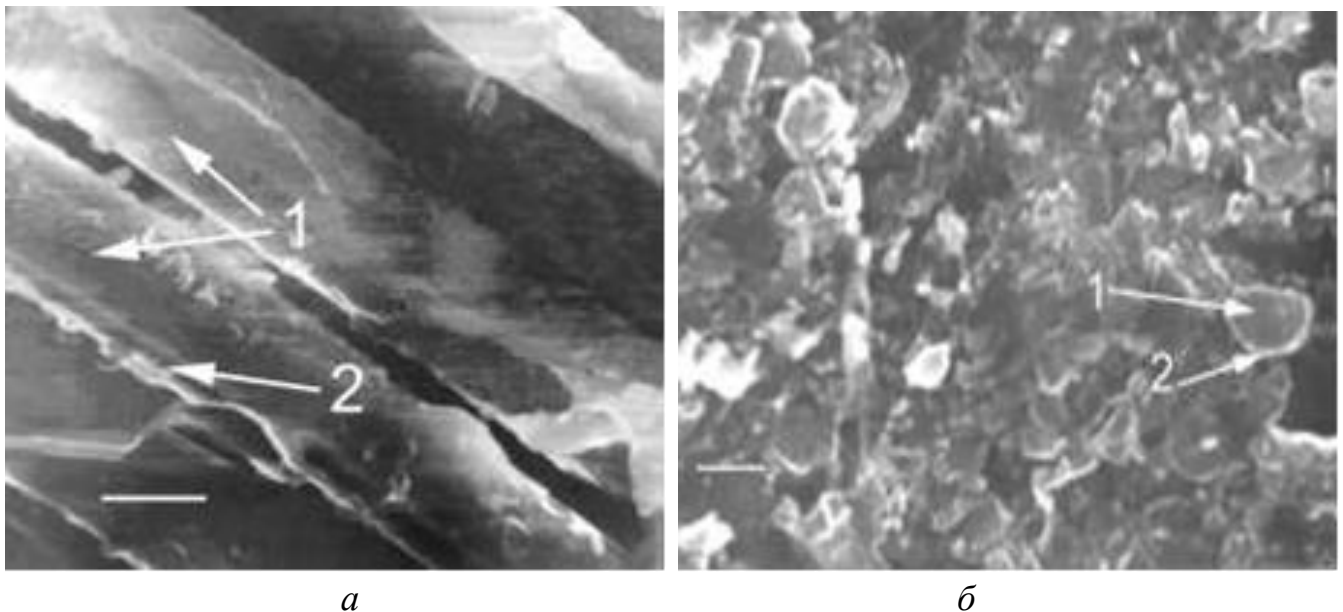


Рис. 7 Растрові електронні мікрофотографії поперечного *a* і поздовжнього *б* зрізів склобетонного зразка; 1 – скловолокно, 2 - ділянки твердіючого компаунда.

У дисертаційному дослідженні розроблено найбільш ефективний склад склофібробетону і визначено його властивості при нормальному твердінні з використанням склофібри, нанодисперсного кремнезему та просочувальної рідини на

основі рідкого скла. Сталим залишалося співвідношення цементу, піску і В/Ц (табл. 4).

Таблиця 4

Експлуатаційні властивості ефективного складу склофібробетону

Властивості	Одиниці виміру	Показники		
		бетон без армування	фібробетон без просочення	фібробетон з просоченням
Середня щільність	кг/м ³	2010	2160	2480
Міцність на стиск	МПа	41	52	71
Міцність на згин	МПа	7	9	15
Водопоглинання	%	4,8	3,5	1,3
Морозостійкість	цикли	150	200	400
Усадка	мм/м	2,7	1,6	1,1
Модуль пружності	МПа	36×10^3	41×10^3	44×10^3

Проаналізувавши експериментальні данні можна дійти висновку, що флюатація склофібробетону сприяє збільшенню показників міцності на стиск на 36,5%, міцності на розтяг - на 67%.

Просочені склофібробетони характеризуються високими експлуатаційними показниками, що є підтвердженням створення щільної структури композиційного матеріалу. У складі просоченого склофібробетону спостерігається зниження показника водопоглинання в 3,7 рази у порівнянні з контрольним складом, збільшенням марки за морозостійкістю в 3 рази, зниженням усадочних деформацій в 2,5 рази. Запобігання проникнення вологи позитивно позначається на термінах експлуатації виробів з модифікованого склофібробетону, підвищує їхню морозостійкості.

У п'ятому розділі наведено розрахунки економічного ефекту та рекомендації з організації виробництва малих архітектурних форм з просоченого склофібробетону. Застосування просочення монолітних конструкцій є технічно складним процесом, тому рекомендовано застосовування інтенсивного режиму просочення склофібробетону для заводського виробництва виробів. Розроблена технологічна схема виробництва склофібробетону (рис.8). Для вакуумування вироби укладають у просочувальну камеру, яку герметизують, відкачують з неї повітря та подають до камери просочувальний компаунд. Після витримки розгерметизовують форму та виймають вироби. Після остаточного висихання та перевірки якості виробів їх пакують та відправляють споживачеві. Економічний ефект від застосування

пропонованих технічних рішень досягається завдяки випуску більш якісної продукції та зниженню витрат в'язучого. Очікуваний економічний ефект складає 397,77 грн. на 1 м³ бетону.

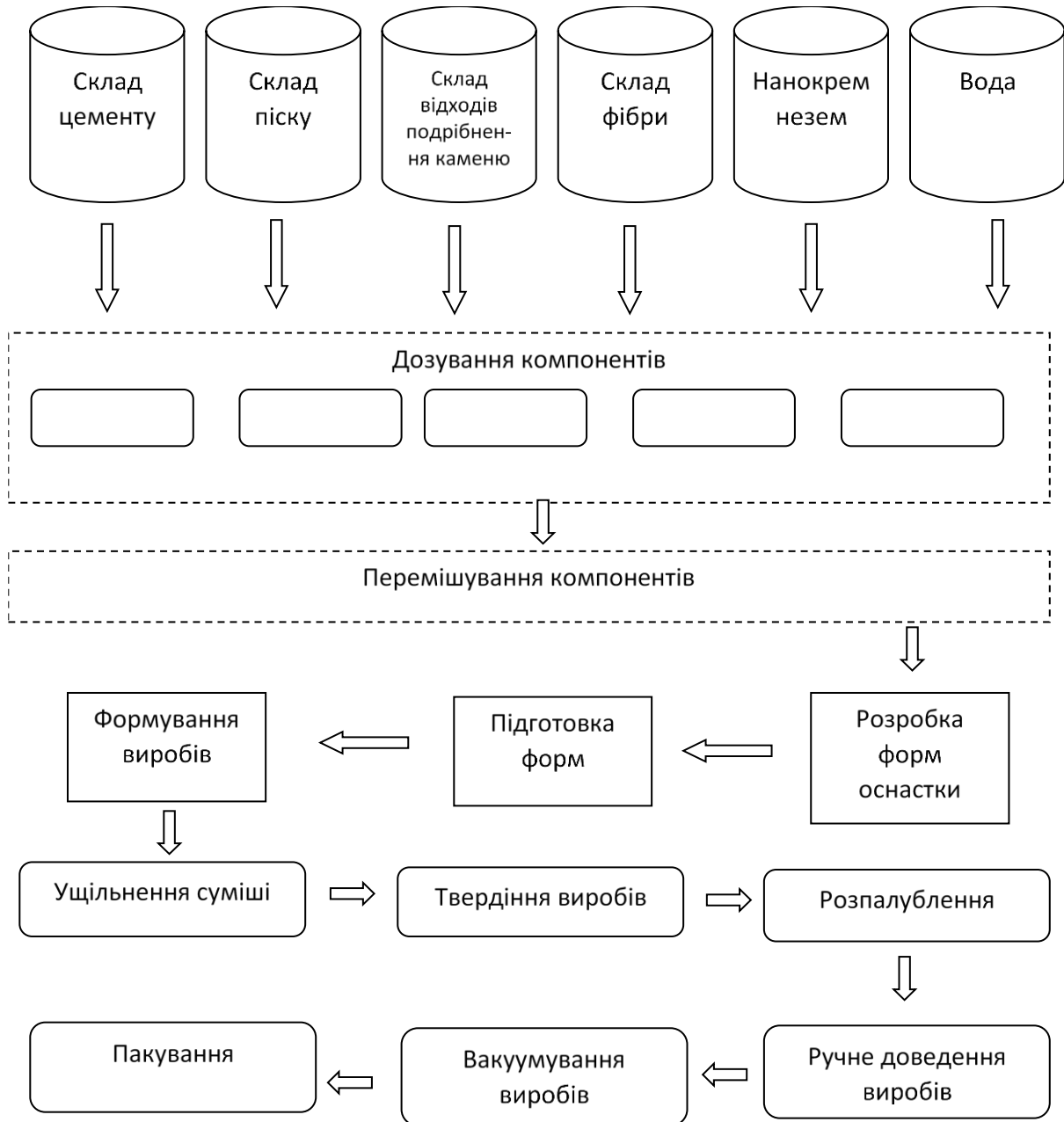


Рис. 8 - Технологічна схема виробництва склофіробетону, просоченого твердіючим компаундом

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено найбільш ефективний склад компонентів склофібробетону: скловолокно діаметром 10-13 мкм, довжиною 13-15 мм - 4%; нанокремнезем - 0,8% від маси цементу; В/Ц=0,45; цемент - 550 кг/м³; пісок - 1375 кг/м³.

2. Розроблено, згідно з визначеними вимогами хімічно нейтральний компаунд складу: рідина - рідке скло, нейтральний наповнювач - нанодисперсний кремнезем Ковелос-05, затверджувач рідини – кремнефторид натрію. Рідке скло реагує з оксидом кальцію таким чином, що утворюються низькоосновні гідросилікати кальцію групи тобермориту та лужні гідроалюмосилікатами групи цеолітів.

3. Рентгенографічним аналізом визначено підвищення корозійної стійкості скловолокна у просоченому склофібробетоні завдяки зниженню інтенсивності піків портландіта Ca(OH)₂ з одночасним підвищенням інтенсивності піків гідросилікатів кальцію порівняно з контрольними зразками.

4. Дослідним шляхом визначено технологічний прийом введення затверджувача в компаунд: порошок кремнефториду натрію (5г) попередньо розчиняється з водою (7%) при температурі 95 - 100⁰С та додається до водного розчину рідкого скла (50%), підігрітого до 60⁰С, що надає каучукову консистенцію компаунду, а з плином часу перетворює в пастоподібну масу, схоплює і твердне.

5. Визначено, що просочений склофібробетон характеризується збільшенням міцності на стиск на 36,5%, міцності на розтяг - на 67%, збільшенням марки морозостійкості склофібробетону з F150 до F400 і зниженням водопоглинання з 5,8% до 1,3%, зниженням усадочних деформацій з 2,7 до 1,1 мм/м.

6. Розроблено технологічну схему виробництва малих архітектурних форм з просоченого склофібробетону, як серійних, так і високоякісних штучних виробів.

7. Визначено економічну ефективність застосування запропонованих технічних рішень, що ґрунтуються на зменшенні маси виробів, зменшенні товщини плиток, незнімальної опалубки. Очікуваний економічний ефект складає 397,77 грн. на 1 м³ бетону.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Наливайко Т.Т. Армирование бетонных конструкций/ Т.Т. Наливайко// Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2014. – Т. 75, № 1. – С. 59-62.

Особистий внесок автора: порівняльний аналіз способів армування бетонних конструкцій, дослідження мікроструктури бетону.

2. Токарев М.Н., Наливайко Т.Т. Повышение плотности бетона путем его пропитки/ Т.Т. Наливайко, М.Н. Токарев// Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2014. – Т. 76, №2. – С. 110-115.

Особистий внесок автора: експериментальне дослідження оптимального складу рідини для просочення фіброцементу та отримання показників підвищення щільності фібробетону.

3. Дистанов В.Б., Токарев М.М., Наливайко Т.Т. Повышение прочности и плотности стеклобетона/ В.Б. Дистанов, Т.Т. Наливайко, М.Н. Токарев// Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2014. – №53(1095). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 28-33. (Ulrich's Periodicals Directory).

Особистий внесок автора: досліджена технологія просочення фібробетону, розроблено методи підвищення міцності склобетону.

4. Наливайко Т.Т., Токарев М.Н. Повышение прочности и плотности стеклобетона/ Т.Т. Наливайко, М.Н. Токарев// Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2015. - № 1. - С. 113-116.

Особистий внесок автора: удосконалена технологія просочення фібробетону за допомогою просочувальної установки.

5. Дистанов В.Б., Токарев М.М., Наливайко Т.Т. Физическая модель интенсивной пропитки стеклобетона/ В.Б. Дистанов, Т.Т. Наливайко, М.Н. Токарев// Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2016. – №19. – (Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів). – С. 92-95 (Ulrich's Periodicals Directory).

Особистий внесок автора: удосконалено фізичну модель інтенсивного просочення склобетону компаундом, що затвердіває.

6. Казімагомедов І.Е., Наливайко Т.Т. Повышение коррозионной стойкости стекловолокна в среде гидратирующего цемента/ І.Е. Казімагомедов, Т.Т. Наливайко// Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2019. – Т.96, №2. – С. 291-295

Особистий внесок автора: досліджено оптимізацію складу фібробетону зі скловолокном та нанокремнеземом при їх різному дозуванні.

7. Sopov V.P, Kazimagomedov I.E., Nalivayko T.T. Intensification of the process of replacement of fiber concrete surfaces/ V.P. Sopov, I.E. Kazimagomedov, T.T. Nalivayko// East European Science Journal .– Warsaw, Poland, 2019 – Vol. 2. - №8(48). – С. 55-60 (Index Copernicus).

Особистий внесок автора: наведено аналіз сучасних методів просочення, показано детальний процес режиму інтенсивного просочення

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Наливайко Т.Т. Композиционные материалы, армированные неметаллической арматурой [Тези] /Т.Т. Наливайко, М.Н. Токарев: Сборник докладов Международной научно-практической конференции молодых ученых и исследователей «Приоритетные направления науки и техники». – Пенза: ПГУАС, 2014 – С.156-160

Особистий внесок здобувача: досліджено ефективність застосування неметалевої арматури в цивільному та промисловому будівництві

2. Наливайко Т.Т. Влияние длительных сжимающих напряжений на прочность бетонных и сталефибробетонных призматических элементов [Тези]/

Д.В. Мироненко, В.П. Сопов, Т.Т. Наливайко: 7-ма Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», м. Харків, УкрДУЗТ, 2018. – С. 127-129

Особистий внесок здобувача: проведено аналіз надійності та довговічності сталевібробетонних елементів

3. Наливайко Т.Т. Оцінка точності визначення геометричних параметрів ходових коліс мостових підйомних кранів універсальним лазерно – дзеркальним пристроєм [Тези]/ О.В. Торубалко, Т.Т. Наливайко: 73-я Науково-технічна конференція, ХНУБА, 2018. – С. 59-60

Особистий внесок здобувача: досліджено точність вимірювання, вдосконалено застосування лазерного пристрою

4. Наливайко Т.Т. Пластифікуючий ефект поверхнево-активних речовин в розчинах і бетонах на лужних цементах [Тези]/ Т.Т. Наливайко: Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Буд-майстер-клас-2018», м. Київ, КНУБА, 2018. – С. 242-244

Особистий внесок здобувача: досліджено пластифікуючий ефект поверхнево – активних речовин, наведено результати дослідження

5. Наливайко Т.Т. Використання модифікованого фібробетону для підвищення експлуатаційних властивостей будівельних конструкцій електрифікованих залізничних доріг [Тези]/ Т.А. Наливайко, І.Е. Казімагомедов, Т.Т. Наливайко: 9-та Міжнародна наукова конференція «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд», м. Харків, ХНУБА, 2019. – С. 77-79

Особистий внесок здобувача: досліджено підвищення міцності бетонних виробів в транспортному будівництві при використанні фібробетону зі структурою, яка виключає проникнення вологи і має високий електроопір

6. Наливайко Т.Т. Флюатування склофібробетонів рідкими компаундами [Тези]/ В.П. Сопов, Т.Т. Наливайко: 5-та Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і методи будівельного матеріалознавства», м. Харків, ХНУБА, 2019 – С. 47-67

Особистий внесок здобувача: наведено результати просочення склофібробетону компаундом на основі рідкого скла та кремнефториду натрію з утворенням флюориту.

АНОТАЦІЯ

Наливайко Т.Т. Підвищення міцності склофібробетону шляхом інтенсивного просочення компаундом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – Будівельні матеріали і виробни. – Харківський національний університет будівництва та архітектури, Харків, 2019.

Метою дисертаційної роботи є поліпшення фізико-механічних показників склофібробетону шляхом інтенсивного просочення компаундом складу: рідина - рідке скло, нейтральний наповнювач – нанодисперсний кремнезем Ковелос-05, затверджувач рідини – кремнефторид натрію. Рідке скло реагує з оксидом кальцію таким чином, що утворюються низькоосновні гідросилікати кальцію та лужні гідроалюмосилікатами групи цеолітів. Таке технологічне рішення сприяє армуванню фібробетону скловолокном з подовженим терміном експлуатації виробів.

Встановлено найбільш ефективний склад компонентів склофібробетону: скловолокно діаметром 10-13 мкм, довжиною 13-15 мм – 4%, нанокремнезем – 0,8% від маси цементу, В/Ц=0,45, Ц = 550 кг/м³, П = 1375 кг/м³. Визначено корозійну стійкість скловолокна у лужному середовищі бетону при додаванні нанокремнезему, завдяки прискореному утворенню гідросилікатів кальцію.

Визначено, що інтенсивне просочення рідким компаундом впливає на збільшення міцності склофібробетону на 36,5%, зниженню водопоглинання з 5,8% до 1,3% та збільшенню морозостійкості з F150 до F400.

Розроблено технологічну схему виробництва малих архітектурних форм з просоченого склофібробетону, як серійних, так і високоякісних штучних виробів. Економічний ефект від застосування пропонуваніх технічних рішень досягається завдяки зменшенню маси виробів, зменшенню товщини плиток, незнімальної опалубки.

Ключові слова: склофібробетон, просочення, дисперсне армування, скловолокно, нанокремнезем, рідке скло.

АННОТАЦИЯ

Наливайко Т.Т. Повышение прочности стеклофибробетона путем интенсивной пропитки компаундом. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия. – Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков, 2019.

Целью диссертационной работы является улучшение физико-механических показателей стеклофибробетона путем интенсивной пропитки компаундом, состава: жидкость - жидкое стекло, нейтральный наполнитель – нанодисперсний кремнезем Ковелос-05, отвердитель жидкости – кремнефторид натрия. Жидкое стекло реагирует с составными частями цементного клинкера таким образом, что способствует образованию низькоосновных гідросилікатов кальція и щелочные гидроалюмосилікати группы цеолитов. Такое технологическое решение позволяет армировать фибробетон стекловолокном с продленным сроком эксплуатации изделий.

Установлены оптимальные значения составляющих стеклофибробетона со стекловолокном диаметром 10 - 13 мкм при длине 13 -15 мм, содержанием - 4%, нанокремнеземом - 0,8% от массы цемента, при В/Ц= 0,45, Ц = 550 кг/м³,

$\Pi = 1375 \text{ кг/м}^3$. Определено коррозионную стойкость стекловолокна в щелочной среде бетона при добавлении нанокремнезема, благодаря ускоренному образованию гидросиликатов кальция.

Выявлено, что интенсивная пропитка жидким компаундом позволяет увеличить прочность стеклофибробетона на 36,5%, снизить водопоглощение с 5,8% до 1,3% и повысить морозостойкость с F150 до F400.

Разработанная технология малых архитектурных изделий из пропитанного фибробетона позволяет изготавливать как серийные изделия, так и высококачественные искусственные изделия. Экономический эффект от применения предлагаемых технических решений достигается благодаря уменьшению массы изделий, уменьшению толщины плиток, несъемной опалубки.

Ключевые слова: фибробетон, пропитка, дисперсное армирование, стекловолокно, нанокремнезем, жидкое стекло.

ABSTRACT

Nalivayko T.T. Increasing the strength of fiberglass concrete by intensive impregnation with a compound. - On the rights of the manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.05 - Building materials and products. - Kharkov National University of Construction and Architecture, Kharkov, 2019.

The purpose of the thesis is to improve the physical and mechanical properties of fiberglass concrete by intensive impregnation with a compound, composition: liquid - liquid glass, neutral filler - nanosized silica Kovelos-05, hardener liquid - sodium silicofluoride. Water glass reacts with the components of cement clinker in such a way that it promotes the formation of low-basic calcium hydrosilicates and alkaline hydroaluminosilicates of the zeolite group. Such a technological solution allows fiber reinforced concrete to be reinforced with fiberglass with an extended product life.

The optimal composition of the impregnating liquid was found out. A brief description of the methods that were used in the research: determination of compressive strength and bending of fiber-concrete samples of beams, frost resistance and water absorption. A brief description of the method of mathematical planning of the experiment, which was used to optimize the number of components of fiber concrete.

It was found that the addition of nanosilicon to disperse-reinforced composites and impregnation with liquid sodium glass can directly affect the increase in the corrosion resistance of fiberglass in the cement matrix and increase the strength of the composition as a whole. Studies have shown that nanosilicon, having a developed specific surface area and increased chemical activity, is able to prevent corrosion of glass fibers. But the effect of filling pores created puzolana spherical microparticles nanogrammes, allows to partially reduce porosity and permeability of concrete.

Restoration of the continuity of the porous structure of disperse-reinforced compositions and, accordingly, strength, is possible by filling voids with substances of

liquid consistency hardening in them. For this purpose studies of existing types of impregnation were carried out. With capillary impregnation, the rise of the liquid depends on the radius of the pores. When fully immersed, air is trapped in the center of the pore space. With a one-way supply, only 70 – 75% of the porous space is filled under pressure. In addition, impregnation under pressure lasts a few hours (5-6 hours). It is established that the process of filling the fiber concrete with a hardening liquid is characterized by the presence of two forces: the driving force and the reactive force. Achieving completeness and acceleration of the rate of impregnation is possible if the air bleed capillary-porous body, for intense mode of impregnation in which the product is to be impregnated is subjected to vacuumable. This is achieved by using piston vacuum pumps or advanced two-stage rotary pumps.

To conduct the impregnation in intensive mode was used Laboratory impregnation plant is design with a chamber in which a vacuum is created, and has the ability to impregnation at a pressure, which increases the speed and completeness of impregnation. The main feature of the intensive impregnation mode is the condition according to which, after pumping out the air, the product is immersed in the leaking liquid so that it retains the achieved vacuum, and the entire body is surrounded by the surrounding liquid. The use of non-alkali resistant fiberglass is possible use an intensive mode of impregnation skillon liquid glass that will not only help prevent corrosion of the fibers in the cement environment, and filling the pore space of the body of concrete.

The optimal values of the components of fiberglass concrete with fiberglass with a diameter of 10 - 13 microns with a length of 13 -15 mm, content - 4%, nanosilica – 0,8% by weight of cement, at $W/C = 0,45$, cement - 550 kg/m^3 , sand - 1375 kg/m^3 . The corrosion resistance of fiberglass in the alkaline medium of concrete with the addition of nanosilica was determined due to the accelerated formation of calcium hydrosilicates.

It was revealed that intensive impregnation with a liquid compound allows to increase the strength of fiberglass concrete by 36,5%, reduce water absorption from 5,8% to 1,3% and increase frost resistance from F150 to F400.

The developed technology of small architectural products from impregnated fiber-reinforced concrete allows to produce both serial products and high-quality artificial products. The economic effect of the application of the proposed technical solutions is achieved by reducing the mass of products, reducing the thickness of tiles, tiles, fixed formwork.

Key words: fiber-reinforced concrete, impregnation, dispersed reinforcement, fiberglass, nanosilica, liquid glass.