

10. Lind H., Annadotter K., Björk F., Högberg L. and Af Klintberg T. Sustainable Renovation Strategy in the Swedish Million Homes Programme : A Case Study. Sustainability. 2016, no. 8, p. 388. URL: <https://doi.org/10.3390/su8040388>

11. Sodagar B. Sustainability Potentials of Housing Refurbishment. Buildings. 2013, no. 3, pp. 278–299. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings3010278>

Надійшла до редакції : 07.02.2025.

УДК 624.131

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.112.1150

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ЗОВНІШНЬОГО ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ДО ВПЛИВУ АГРЕСИВНИХ ФАКТОРІВ

ПУСТОВОЙТОВА О. М.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
ФІРСОВ П. М.², канд. техн. наук, доц.,
КАМЧАТНА С. М.³, канд. техн. наук, доц.,
ОРЕЛ Є. Ф.⁴, канд. техн. наук, доц.,
ГВОЗДЮК О. А.⁵, асп.

^{1*} Кафедра будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61000, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-07, e-mail: oksana_pustov@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-4774-6686

² Кафедра будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61000, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-07, e-mail: pavelfirsov1991@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9119-3968

³ Кафедра вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту, площа Фейєрбаха, 7, 61001, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-19-21, e-mail: kamchatna.s.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5711-4146

⁴ Кафедра вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту, площа Фейєрбаха, 7, 61001, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-19-21, e-mail: orel_fisherman@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6261-1558

⁵ Кафедра будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61000, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-07, e-mail: gvozduksasha@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-7856-9094

Анотація. *Постановка проблеми* Розглянуто властивості композитного матеріалу, призначеного для зовнішнього посилення залізобетонних конструкцій. Отримані результати дають змогу оцінити стійкість матеріалу до агресивних чинників, що є ключовим для визначення його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання композитного матеріалу для підсилення конструкцій, підкреслюючи його потенціал у забезпеченні надійності та тривалого терміну служби залізобетонних елементів. На основі отриманих даних рекомендується впровадження класу будівельних виробів і конструкцій, посилених стрічковою склопластиковою арматурою. *Мета роботи.* Для розширення застосування склопластиків у будівництві необхідно вирішити ряд завдань, пов'язаних з вибором найбільш відповідних типів склопластикового матеріалу, а також оцінкою довговічності та надійності конструкцій, що отримуються. Метою дослідження є вивчення властивостей композитного матеріалу, що використовується для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій, які визначають його стійкість до агресивних факторів, з метою оцінки його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. *Висновки.* У статті було досліджено властивості композитного матеріалу, призначеного для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій. Отримані результати дозволяють оцінити стійкість матеріалу до агресивних факторів, що є ключовим для визначення його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання композитного матеріалу для підсилення конструкцій, підкреслюючи його потенціал у забезпеченні надійності та тривалого терміну служби залізобетонних елементів.

Ключові слова: склопластикова стрічка; водопоглинання; коефіцієнт дифузії; коефіцієнт сорбції; коефіцієнт проникності зовнішнє підсилення

RESEARCH OF THE RESISTANCE OF COMPOSITE MATERIAL FOR EXTERNAL ENHANCEMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TO THE INFLUENCE OF AGGRESSIVE FACTORS

PUSTOVOITOVA O.M.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
FIRSOV P.M.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KAMCHATNA S.M.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
OREL Yev.F.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
GVOZDUK O.A.⁵, *Pochtgrad. Stud.*

^{1*} Department of Building Constructions, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Bazhanova Str., Kharkiv, 61000, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-07, e-mail: oksana_pustov@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-4774-6686

² Department of Building Constructions, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Bazhanova Str., Kharkiv, 61000, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-07, e-mail: pavelfirsov1991@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9119-3968

³ Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61001, Ukraine, tel. +38 (057) 730-19-21, e-mail: kamchatna.s.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5711-4146

⁴ Department of Research and Designing of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61001, Ukraine, tel. +38 (057) 730-19-21, e-mail: orel_fisherman@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6261-1558

⁵ Department of Building Constructions, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Bazhanova Str., Kharkiv, 61000, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-07, e-mail: gvozduksasha@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-7856-9094

Abstract. Problem statement. The article studies the properties of composite material intended for external reinforcement of reinforced concrete structures. The obtained results make it possible to evaluate the material resistance to aggressive factors, which is the key to determine its efficiency and durability under operating conditions. The conducted research confirms the feasibility of using composite material for reinforcement of structures, emphasizing its potential in providing reliability and long service life of reinforced concrete elements. On the basis of the obtained data it is recommended to introduce a class of building products and structures reinforced with strick fiberglass reinforcement. **The purpose of the article.** To expand the use of fiberglass in construction, it is necessary to solve a number of problems related to the selection of the most suitable types of fiberglass material, as well as the assessment of the durability and reliability of the resulting structures. The aim of the study is to investigate the properties of a composite material used for external reinforcement of reinforced concrete structures that determine its resistance to aggressive factors in order to assess its efficiency and durability in service. **Conclusions.** The paper investigates the properties of a composite material intended for external reinforcement of reinforced concrete structures. The results obtained allow us to assess the material's resistance to aggressive factors, which is key to determining its efficiency and durability in service. The conducted studies confirm the feasibility of using a composite material for reinforcing structures, emphasizing its potential in ensuring the reliability and long service life of reinforced concrete elements.

Keywords: fiberglass band; water absorption; diffusion coefficient; sorption coefficient; permeability coefficient external reinforcement

Постановка проблеми. Одним із ключових завдань сучасного будівництва є створення ефективних та довговічних виробів та конструкцій, особливо тих, що працюють в агресивних умовах експлуатації. Часто виникає необхідність розробки конструкцій з особливими властивостями, такими як немагнітність та діелектричність, що робить традиційні матеріали непридатними для таких цілей [1].

Сучасні наукові та технічні досягнення дозволяють розробляти будівельні вироби, що відповідають цим вимогам, за рахунок використання передових технологій на етапах проектування, виробництва та

експлуатації. Застосування пластмас у будівництві значно покращує експлуатаційні характеристики будівель та споруд, підвищуючи їхню довговічність та надійність, одночасно знижуючи їх вагу та скорочуючи терміни будівництва. Це також веде до економії металу [2].

Одним із найбільш затребуваних матеріалів у цьому напрямку є склопластики, що мають унікальне поєднання властивостей, які вигідно відрізняють їх від традиційних будівельних матеріалів. Завдяки своїм високим технічним характеристикам, склопластики вже знайшли широке застосування у різних

галузях промисловості, у тому числі й у будівництві, де вони використовуються для виготовлення конструкційних елементів та деталей.

Спостерігається стійка тенденція до збільшення використання склопластиків у будівельній галузі. Особливо перспективним є застосування склопластикової арматури для посилення бетонних конструкцій.

До залізобетону, як основного будівельного матеріалу, пред'являються все більш високі вимоги щодо міцності, тріщиностійкості та довговічності. Часто залізобетонні конструкції пошкоджуються через корозію сталевих арматур, особливо під впливом таких факторів, як атмосферні умови, морська вода, димові гази або електричні струми. У випадках, коли потрібні інженерні конструкції з діелектричними та немагнітними властивостями, використання сталевих арматур протипоказане. Традиційні методи підвищення ефективності залізобетонних конструкцій не вирішують усіх цих завдань.

Подальший розвиток залізобетонних конструкцій пов'язаний із впровадженням ефективних видів арматури, таких як неметалічна склопластикова арматура, яка здатна суттєво підвищити їх експлуатаційні характеристики.

Теоретичні та експериментальні дослідження, підтвердили можливість застосування склопластикової арматури на практиці [3; 4]. Основними перевагами склопластикової арматури в порівнянні з металевією є її висока корозійна стійкість, а також антимагнітні та діелектричні властивості. Склопластикова арматура легша за сталеву більш ніж втричі, а її характеристики міцності перевищують показники сталі в 3,5–4 рази.

Незважаючи на численні дослідження в цій галузі, існує безліч невирішених питань, що ускладнює широке застосування склопластикової арматури замість сталевієї. Зокрема, недостатньо вивчені хімічні взаємодії між бетоном та склопластиковією арматурією.

Потрібні подальші дослідження, спрямовані на вивчення властивостей склопластиковієї арматури, розробку ефективних методів армування, а також створення високотехнологічних виробів та конструкцій, які дозволять максимально використовувати фізико-хімічні та механічні властивості склопластику та бетону.

У представленій роботі, як армуючий матеріал запропонований тип арматури – стрічкова склопластикова арматура (ССПА).

ССПА – це високоефективний композиційний матеріал, який у поєднанні з бетоном та іншими будівельними матеріалами підходить для створення нових комплексних виробів. Можливість контролювати процес армування та керувати орієнтацією стрічкової арматури дозволяє створювати штучну анізотропію властивостей, що відповідає необхідним силовим та експлуатаційним навантаженням. ССПА виконує як зміцнювальні, так і захисні функції. Вона сприяє підвищенню міцності, довговічності, корозійної стійкості, а також покращенню екологічної безпеки, зниженню матеріаломісткості та металомісткості, зниженню маси конструкції, одночасно забезпечуючи високі показники діелектричних та магнітних властивостей.

Аналіз публікацій. Запропоновано [5; 6] використати скляне волокно для армування бетону, що було підтверджено експериментально. Скляне волокно має ряд переваг: його щільність у 3,5 рази менша за щільність сталі, воно має низький коефіцієнт теплопровідності, високу вібростійкість і відмінні електрофізичні властивості. Скляне волокно також відрізняється високою механічною міцністю.

Однак, є ряд недоліків: модуль пружності скляного волокна вдвічі вищий, ніж у бетону та окремі волокна, через природні властивості скла, чутливі до механічних впливів, особливо до ударів.

Особливе значення має питання хімічної взаємодії скляного волокна з вологим середовищем свіжоукладеного бетону. При повній гідратації цемент освоює близько

20 % води, а решта води залишається у вигляді адсорбованих плівок на твердих частинках. Арматура зі скляного волокна в бетоні тривалий час піддається дії вологи. Дослідження показують, що міцність скляного волокна на розрив у вологому середовищі дещо нижча, ніж у сухому, особливо при тривалому впливі навантаження (статична втома).

Звичайний цементний бетон характеризується високою лужністю водяних плівок. У залізобетонних конструкціях ці лужні плівки мають пасивну дію на сталеву арматуру, формуючи на її поверхні тонкий оксидний шар, який захищає метал від корозії. Однак лужне середовище надає інше вплив на скляне волокно, викликаючи рівномірне розчинення всіх його компонентів. Автоклавна обробка готових конструкцій під впливом пару високого тиску прискорює процес корозії скляного волокна, що в кінцевому підсумку може призвести до повної втрати міцності скляної арматури.

Один із шляхів запобігання цьому процесу – виключення контакту склопластикової арматури з агресивним середовищем бетону на стадії його твердіння. Серед розроблених методів є технологія безперервного намотування арматури на готову бетонну конструкцію (сердечник). Інший спосіб полягає у використанні склопластикової арматури в полімербетонних виробках, де середовище свіжоукладеного бетону не чинить агресивного впливу на склопластик.

За результатами проведених досліджень [7], було розроблено технологію виготовлення комбінованих будівельних конструкцій. Ця технологія забезпечує створення склопластикового каркасу з необхідними міцнісними та деформативними характеристиками. Також були досліджені короткочасні та тривалі характеристики міцності склопластикових елементів.

Мета статті. Для розширення застосування склопластиків у будівництві необхідно вирішити ряд завдань, пов'язаних з вибором найбільш відповідних типів

склопластикового матеріалу, а також оцінкою довговічності та надійності конструкцій, що отримуються.

Метою статті є – дослідити властивості композитного матеріалу, що використовується для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій, які визначають його стійкість до агресивних факторів, з метою оцінки його ефективності та довговічності в умовах експлуатації.

Виклад матеріалу. Як армуючий матеріал пропонується використовувати стрічкову склопластикову арматуру (ССПА), яка є різновидом склопластикової арматури. Управління процесом безперервного армування (намотки) та завдання орієнтації стрічки дозволяють створювати штучну анізотропію властивостей, адаптовану до різних зовнішніх впливів як силовим, так і несиловим.

Стрічкова склопластикові арматура має ряд переваг перед іншими видами склопластикової арматури. Її використання методом намотування дозволяє легко формувати суцільні покриття, оболонки та інші елементи. Такі покриття можуть мати як постійну товщину, так і змінну довжину конструкції. Стрічкова форма особливо підходить для багатошарового намотування, забезпечуючи однорідну структуру склопластикової оболонки.

Застосування ССПА виправдано також за рахунок її високих специфічних властивостей, як-то висока міцність при розтягу і стійкість до корозії, що робить її кращим вибором широкого спектра будівельних завдань.

Для дослідження основних міцнісних та деформаційних характеристик даної арматури необхідно враховувати всю складність напружено-деформованого стану, характерного для безперервної арматури. Ключовими контрольованими параметрами в цьому випадку були: щільність склопластику, водопоглинання, хімічна стійкість, а також визначення оптимального вмісту сполучних компонентів та ступеня їх затвердіння.

Щільність склопластику визначалася методом гідростатичного зважування [8; 9]. Для випробувань були відібрані зразки склопластику, вирізані з ґратчастих елементів каркасу, які зважувалися на аналітичних вагах з точністю до 0,0002 г. Зразки занурювали в етиловий спирт для видалення повітряних бульбашок, потім витягували та акуратно витирали фільтрувальним папером.

Зразки по черзі підвішувалися на тонкому дроті до коромисла ваги, після чого під зразок поміщали ємність з етиловим спиртом для проведення повторного зважування. Для цього ємність з етиловим спиртом встановлювали на окрему підставку, не пов'язану з чашкою терезів, занурювали зразок у рідину і проводили зважування, після чого окремо зважували дріт без зразка.

Щільність склопластику розраховували за формулою:

$$\rho = \frac{g}{g - (b_1 - b_2)} \cdot \rho_0, \quad (1)$$

де g – маса зразка на повітрі, г; b_1 – маса зразка та дріт в спирті, г; b_2 – маса дроту в спирті, г; ρ_0 – щільність спирту при 20 °С, г/см³.

Як результат випробувань було прийнято середнє арифметичне всіх вимірювань, за підсумками яких щільність склопластику склала 1,8 г/см³.

Водостійкість склопластику залежить від наявності пор та мікротріщин, а також від водостійкості сполучного матеріалу та скловолокна, використаного в композиції. Водостійкість сполучного визначається присутністю полярних груп у затверділому полімері [10]. Майже всі епоксидні сполучні містять полярні групи, такі як гідроксильні та амінні. Збільшення кількості таких груп у складі сполучного призводить до погіршення водостійкості склопластиків.

Додавання інертних пластифікаторів, таких як дибутилфталат, також знижує водостійкість сполучного, оскільки послаблює міжмолекулярні взаємодії.

Зниження міцності скловолокна під впливом вологи пов'язане з адсорбцією води

на поверхні скла та хімічним руйнуванням волокон, зокрема через вимивання водорозчинних компонентів скла. Водостійкість скловолокна зростає при зменшенні вмісту лужних компонентів у складі скла.

У зв'язку з цим було необхідно провести дослідження з визначення водопоглинання отриманого склопластику в залежності від часу його знаходження у воді при температурі 20 °С. Водопоглинання визначалося як відсоток вологи, набраної зразком за певний час.

Для цього виготовили склопластик за тією ж рецептурою та технологією, що і для ґратчастих каркасів, товщиною 3 мм. З матеріалу було вирізано зразки шириною 50±1 мм, торці яких закрили сполучним того ж складу. Підготовлені зразки поміщали в сушильну шафу при температурі 105±2 °С і висушували до досягнення постійної маси. Потім зразки занурювали ексікатор з дистильованою водою.

Через певні інтервали часу зразки витягували, витирали фільтрувальним папером і одразу зважували. Відсоток водопоглинання розраховувався як різниця між масою зразків до та після перебування у воді.

На рисунку 1 показано залежність водопоглинання склопластику від часу його знаходження у воді. Як видно, найбільший відсоток вологи (0,08 %) склопластик набирає у першу добу, після чого процес уповільнюється та стабілізується до 50 діб. Порівнюючи отримані результати водопоглинання за 24 години з відомими характеристиками конструкційних склопластиків можна оцінити придатність досліджуваного матеріалу.

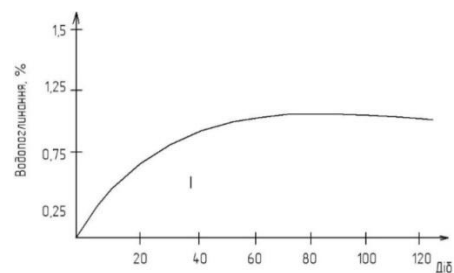


Рис. 1. Залежність вимірювання водопоглинання склопластику від тривалості перебування у дистильованій воді

Відомо, що епоксидний склопластик має високу хімічну стійкість до агресивних середовищ. Однак його стійкість значною мірою залежить від технології виробництва та складу вихідних компонентів.

Склопластикові каркаси, що входять до складу елементів дахів, можуть піддаватися впливу парів агресивних середовищ, таких як кислоти та луги, як у промислових умовах, так і сільському господарстві. Концентрація агресивних рідин у повітрі покриття зазвичай невисока. Для оцінки хімічної стійкості епоксидного склопластику, виготовленого «мокрим» способом методом намотування косої перехресної структури з використанням затверджувача «гарячого» типу - третинного аміну, в якості хімічних реагентів було обрано 10 % розчин NaOH і 5 % розчин H₂SO₄.

До випробування було підготовлені зразки шириною 50±1 мм та товщиною 3±0,2 мм, вирізаних із спеціально виготовленого склопластику. Як сполучний матеріал застосовувалася епоксидна діанова смола ЕД-20, затверділий триетаноламін з додаванням пластифікатора дибутилфталата.

Метод випробування полягав у вимірі зміни маси зразків до та після їх витримання в агресивному середовищі протягом певного часу. Перед початком випробувань зразки кондиціонували при температурі 20±2 °С в умовах, що виключають вплив світла.

Зважування зразків проводилося на аналітичних вагах з точністю до 0,0002 г. Час витримки зразків у 10 % розчині NaOH і 5 % розчині H₂SO₄ склало 90 діб за 20±2 °С.

Зважування зразків проводилося через 24, 48, 72 години і далі кожні 5 діб.

Зміну маси зразків після кожного проміжку випробувань (ΔM) в % обчислювали за формулою:

$$\Delta M = \frac{M_1 - M}{M} \cdot 100, \quad (2)$$

де M – маса зразка до занурення в хімічний реагент, г;

M_1 – маса зразка після витримки його в хімічному реагенті, г.

За отриманими результатами будувалася графічна залежність $\Delta M = f(r)$ (рис. 2).

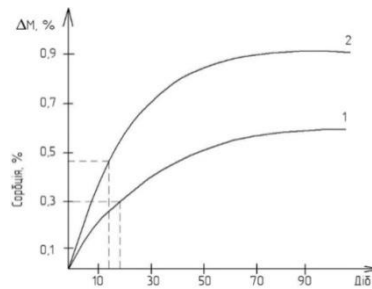


Рис. 2. Кінетика сорбції склопластику:
1 – у 10 % розчині NaOH; 2 – в 5 % розчині H₂SO₄

За графіком визначалося час, за яке відбулося збільшення маси зразка до величини $M_{\max}/2$ і обчислювався коефіцієнт дифузії хімічних реагентів (D):

$$D = 0,0494 \left(\frac{r_0}{\delta^2} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Коефіцієнт сорбції хімічних реагентів в зразках (ρ) визначали по залежності:

$$\rho = \frac{M_p}{V_{\max}}, \quad (4)$$

$$M_p = M_{\max} - M_1. \quad (5)$$

Коефіцієнт проникності хімічного реагенту в склопластику (p) вираховували за залежністю:

$$p = D \cdot S. \quad (6)$$

Таблиця

Значення коефіцієнта дифузії, сорбції, проникності склопластикових зразків

Розчин	Коефіцієнт дифузії м ² /с	Коефіцієнт сорбції %	Коефіцієнт проникності м ² /с
NaOH	2,6·10 ⁻⁹	0,0213	0,554·10 ⁻¹²
H ₂ SO ₄	3,7·10 ⁻⁹	0,0276	10,2·10 ⁻¹¹

Результати обробки – у таблиці.

Висновки

У статті досліджені властивості композитного матеріалу, призначеного для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій. Отримані результати дозволяють оцінити стійкість матеріалу до

агресивних факторів, що є ключовим для визначення його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання композитного матеріалу для підсилення конструкцій, підкреслюючи його потенціал у забезпеченні надійності та тривалого терміну служби залізобетонних елементів.

На підставі отриманих даних рекомендується впровадження класу будівельних виробів та конструкцій,

підсиленних стрічковою склопластиковою арматурою. Така арматура здатна одночасно виконувати як зміцнювальні, так і захисні функції. Вона забезпечує значне покращення експлуатаційних характеристик, включаючи підвищення міцності та довговічності матеріалів, а також корозійну стійкість та екологічну безпеку. Крім цього, використання склопластикової арматури сприяє зниженню матеріаломісткості та металомісткості конструкцій, зменшуючи їх загальну масу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Petro S. H., Kemp E. L., Gangarao H. V. S. Saving covered bridges with glass-fiber-reinforced polymers. *APT Bulletin : The Journal of Preservation Technology*. 2004. № 35 (4). Pp. 27–34. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/4126417>
2. Avdeeva A., Shlykova I., Antonova M., Barabanschikov Y., Belyaeva S. Reinforcement of concrete structures by fiberglass rods. *MATEC Web of Conferences*. 2016. № 53, art. 01006. URL: <http://www.matec-conferences.org/doi:10.1051/mateconf/20165301006>
3. Trykoz L. V., Kamchatnaya S. M., Pustovoitova O. M., Atynian A. O. The investigation of prestressed pressure pipes, reinforced with fiberglass plastic. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018. № 36. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048021864&origin=resultslist>
4. Trykoz L., Pustovoitova O., Kamchatnaya S., Semenova-Kulish V. Fiberglass coating of railway culvert pipes. *International Scientific Conference on Transport Means*. Kaunas 30 September 2020 Kauno Technologijos Universitetas. Pp. 442–445. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190687096>
5. Колесников А. В., Семенова С. В., Вировой В. М., Олійник Т. П. Будівельні композити як об'єкти системного аналізу. *Сучасне будівництво та архітектура: збірник наукових праць*. 2023. № 3. С. 41–49. URL: <http://visnyk-odaba.org.ua/2023-03/3-5.pdf>
6. Maranan G. B., Manalo A. C., Benmokrane B., Karunasena W., Mendis P. Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars. *Engineering Structures*. 2016. № 117. Pp. 422–436. URL: <http://www.journals.elsevier.com/engineering-structures/>
7. Hegemier G., Stewart L. Application of fiber-reinforced polymers to reinforced concrete bridges. *Innovative Bridge Design Handbook : Construction, Rehabilitation and Maintenance*. 2016. Pp. 777–794. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128000588/>
8. Petro S. H., Kemp E. L., Gangarao H. V. S. Saving covered bridges with glass-fiber-reinforced polymers. *APT Bulletin : The Journal of Preservation Technology*. 2004. № 35 (4). Pp. 27–34. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/4126417>
9. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю., Делі О. В. Застосування огороження склопластикового композитного перильного. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 23. С. 214–224.
10. Тунік Т. М., Медведєва О. В., Кропівний В. М., Кирнасовська Т. Є. Хімічні процеси в будівельній галузі : навч. посіб. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. 59 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/10764>

REFERENCES

1. Petro S.H., Kemp E.L. and Gangarao H.V.S. Saving covered bridges with glass-fiber-reinforced polymers. *APT Bulletin : The Journal of Preservation Technology*. 2004, no. 35 (4), pp. 27–34. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/4126417>
2. Avdeeva A., Shlykova I., Antonova M., Barabanschikov Y. and Belyaeva S. Reinforcement of concrete structures by fiberglass rods. *MATEC Web of Conferences*. 2016, no. 53, art. 01006. URL: <http://www.matec-conferences.org/doi:10.1051/mateconf/20165301006>
3. Trykoz L.V., Kamchatnaya S.M., Pustovoitova O.M. and Atynian A.O. The investigation of prestressed pressure pipes, reinforced with fiberglass plastic. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018, no. 36. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048021864&origin=resultslist>
4. Trykoz L., Pustovoitova O., Kamchatnaya S. and Semenova-Kulish V. Fiberglass coating of railway culvert pipes. *International Scientific Conference on Transport Means*. Kaunas 30 September 2020 Kauno Technologijos Universitetas. Pp. 442–445. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190687096>

5. Kolesnykov A.V., Semenova S.V., Vyrovoy V.M. and Oliinyk T.P. *Budivel'ni kompozyty yak ob'ekty systemnoho analizu* [Building composites as objects of system analysis]. *Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura zbirnyk naukovykh prats'* [Modern Construction and Architecture : collection of scientific works]. 2023, no. 3, pp. 41–49. URL: <http://visnyk-odaba.org.ua/2023-03/3-5.pdf> (in Ukrainian).
6. Maranan G.B., Manalo A.C., Benmokrane B., Karunasena W. and Mendis P. Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars. *Engineering Structures*. 2016, no. 117, pp. 422–436. URL: <http://www.journals.elsevier.com/engineering-structures/>
7. Hegemier G. and Stewart L. Application of fiber-reinforced polymers to reinforced concrete bridges. *Innovative Bridge Design Handbook : Construction, Rehabilitation and Maintenance*. 2016, pp. 777–794. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128000588/>
8. Petro S.H., Kemp E.L. and Gangarao H.V.S. Saving covered bridges with glass-fiber-reinforced polymers. *APT Bulletin : The Journal of Preservation Technology*. 2004, no. 35 (4), pp. 27–34. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/4126417>
9. Onyshchenko A.M., Harkusha M.V., Aksonov S.Yu. and Deli O.V. *Zastosuvannia ohorodzhennia skloplastikovoho kompozytnoho perylnoho* [Application of fiberglass composite railing fencing]. *Dorohy i mosty* [Roads and Bridges]. 2021, vol. 23, pp. 214–224. (in Ukrainian).
10. Tunik T.M., Medvedieva O.V., Kropivnyi V.M. and Kyrnasovska T.Ye. *Khimichni protsesy v budivelnii haluzi: navch. posib.* [Chemical processes in the construction industry: a teaching manual]. Kropyvnytskyi : TsNTU, 2020, 59 p. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/10764> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 23.02.2025.