

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію

Наджафова Ельшада Фаїг огли

на тему: «**Бетонні опорні конструкції з неметалевим армуванням для ЛЕП і контактних мереж**» подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії по спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Актуальність теми дисертаційної роботи

Одним із розповсюджених типів пошкоджень залізобетонних опорних конструкцій контактних мереж, які знижують їх довговічність, є корозія арматури внаслідок карбонізації (нейтралізації) захисного шару бетону. У роботі порушується комплекс актуальних питань щодо надійності, довговічності та ресурсу опор контактної мережі залізниць. Зокрема, досліджуються кінетика нейтралізації та інші види корозії залізобетонних конструкцій кільцевого перерізу для прогнозування їхнього остаточного ресурсу, а також несуча здатність бетонних опор з композитною арматурою як альтернативи традиційним залізобетонним опорам, що є вразливими до електрокорозії.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна роботи полягає в подальшому розвитку уявлень щодо процесів карбонізації. Встановлено, що нейтралізація $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вуглекислим газом відбувається через розчинення CO_2 у поровому електроліті; швидкість просування фронту карбонізації визначається дифузією CO_2 . Реакційна здатність щільного центрифугованого бетону залежить від водопоглинання, а ефективний коефіцієнт дифузії CO_2 зменшується з часом через кольтатацію пор кальцитом.

Показано, що довговічність залізобетонних конструкцій залежить, в першу чергу, від товщини захисного шару у центрифугованих опорах контактної мережі.

Сформовано скінченно-елементну модель кільцевого перерізу бетонної конструкції з попередньо-напруженою композитною арматурою. Встановлено закономірності розподілу деформацій і напружень при згині та доведено, що при однаковому армуванні її несуча здатність за другою групою граничних станів є нижчою порівняно із залізобетонною.

Вважаємо, що елементи наукової новизни сформульовані коректно, їх кількість та кваліфікаційні ознаки переважно відповідають нормативним вимогам.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації є достатньо обґрунтованими як з теоретичної, так і з експериментальної точки зору. Їх достовірність підтверджується результатами термодинамічного та кінетичного аналізу процесів карбонізації бетону, числовим моделюванням напружено-деформованого стану конструкцій з попередньо-напруженою композитною ар-

матурою, а також результатами експериментів зі зчеплення арматури з бетоном. Практична реалізація результатів — впровадження методики прогнозування залишкового ресурсу опор на залізниці Азербайджану та включення конструктивних рішень у державні будівельні норми України — додатково підтверджує їх прикладну цінність і обґрунтованість.

Джерельна база роботи включає 98 найменувань, 25% з яких є іноземні джерела, 32% складають посилання на праці університету, в якому виконана робота, у т.ч. власні праці, 17 посилань на державні стандарти.

Оцінка змісту та завершеності дисертації

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету, яка корелює з темою, та конкретизується у задачах, окреслено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано наукова новизна і практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** проаналізовано конструкцію, виробництво та експлуатацію залізобетонних центрифугованих опор контактної мережі залізниць. Встановлено, що попри високу щільність бетону, значні коливання товщини захисного шару призводять до корозії та електрокорозії арматури, скорочуючи ресурс опор. Це обґрунтовує необхідність розробки методики прогнозування їх залишкового ресурсу.

Висунуто гіпотезу про переваги композитної арматури як альтернативи сталевій, завдяки її стійкості до корозії та електрокорозії, що потенційно збільшить довговічність опор. Проте, з огляду на відмінності у фізико-механічних властивостях цих матеріалів, підкреслено потребу в додаткових дослідженнях для розуміння роботи бетонних конструкцій з композитною арматурою.

У **розділі 2** представлено методики досліджень. Запропоновано термодинамічні розрахунки для оцінки реакцій карбонізації та визначення ефективного коефіцієнту дифузії CO_2 як ключового параметра кінетики. Розроблено методики прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій та порівняння несучої здатності опор з композитною та сталевією арматурою за допомогою скінченно-елементного моделювання (ЛІРА-САПР) та експериментальних досліджень на моделях. Також розроблено методику порівняльного дослідження зчеплення арматури з бетоном. Достовірність та обґрунтованість результатів забезпечені застосуванням ліцензованого ПЗ, стандартних/оригінальних методів, статистичною обробкою та збіжністю результатів.

У **третьому розділі** виконано термодинамічний аналіз карбонізації бетону, вперше показавши, що нейтралізація $\text{Ca}(\text{OH})_2$ відбувається через розчинення та дифузію CO_2 , а її кінетика визначається цими процесами та об'ємом доступних пор бетону.

Також вперше отримано скінченно-елементну модель конічної конструкції з попередньо-напруженою композитною арматурою, проаналізовано її напружено-деформований стан. Встановлено, що при однакових параметрах з залізобетонними аналогами, опори з композитною арматурою мають меншу несучу здатність, що вимагає збільшення перерізу арматури або її натягу для

досягнення необхідних характеристик. Модель підтверджує можливість конструювання електрокорозійностійких опор з композитною арматурою.

У розділі 4 подано результати експериментальних досліджень. Встановлено, що ефективний коефіцієнт дифузії CO_2 у бетоні опор зменшується з часом на 37-47% через кольматацію пор. Для прогнозу довговічності опор запропоновано поправочний коефіцієнт 0,6 до розрахункових величин. Визначено, що товщина захисного шару є найбільш впливовим чинником (87%), який гарантує нормативний термін служби опор до 50 років.

Дослідження фізико-механічних властивостей арматури показали, що модуль пружності композитної арматури у 5.4 рази менший за сталеву, що суттєво впливає на напружено-деформований стан. Експерименти виявили схожий характер руйнування моделей (утворення тріщин, розвиток пластичного шарніру), проте моделі з композитною арматурою демонструють менші жорсткість і тріщиностійкість та потребують коригування розрахункових моментів. Також встановлено, що зчеплення композитної арматури з бетоном на 31% менше, ніж у сталевій, що вказує на можливу необхідність анкерування.

У 5 розділі представлено практичне впровадження результатів. Розроблено методику прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій (зокрема, кільцевого перерізу, що піддаються агресивному впливу) апробовано на коксохімічній трубі, де визначено швидкість корозії та рекомендовано заходи з ремонту.

Також методику прогнозування ресурсу залізобетонних опор контактної мережі впроваджено на залізниці Азербайджану для організації своєчасної заміни та забезпечення безпеки руху. На основі досліджень розроблено та включено в проєкт ДБН України конструкцію телескопічних металевих опор на буронабивних фундаментах з бетону, армованого композитною арматурою, а також конструкцію шпали з композитною арматурою.

Впровадження цих результатів забезпечує соціально-економічний ефект через збільшення ресурсу та надійності опор, підвищення безпеки руху, а також впроваджено у навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту.

Завершується робота розгорнутими висновками, які впливають зі змісту роботи, є логічними та слугують віддзеркаленням основних результатів дисертаційної роботи.

Виходячи з аналізу основної частини дисертації, можемо дійти висновку, що мета дисертаційної роботи в ході виконання дослідження була досягнута, а дисертація є завершеною науковою кваліфікаційною працею.

Значення одержаних результатів для науки й практики та рекомендації щодо їх можливого використання

Одержані результати мають важливе значення як для розвитку науки, так і для інженерної практики. Вперше деталізовано механізм карбонізації в щільному бетоні та встановлено залежність дифузії CO_2 від водопоглинання і кольматації пор, що дозволяє обґрунтовано прогнозувати довговічність бетон-

них конструкцій. Розроблена скінченно-елементна модель попередньо-напружених конструкцій з композитною арматурою розширює уявлення про їх напружено-деформований стан. Практична значущість підтверджується впровадженням методики прогнозування ресурсу опор на залізниці Азербайджану та розробкою конструкцій, включених до проєкту ДБН. Результати рекомендовано для використання в проєктуванні, експлуатаційному аналізі та освітніх програмах з будівництва і транспорту.

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації в опублікованих працях

Основні положення та висновки дисертаційної роботи викладено у 11 роботах: 4 статті у фахових виданнях України категорії Б, 1 стаття у виданні, що індексуються НМБД Scopus, 1 додаткова стаття у фаховому виданні України категорії Б, 2 описи до заявок на видачу патентів на корисну модель та винахід і 3 апробаційні публікації за матеріалами міжнародних науково-технічних конференцій.

Таке представлення результатів наукової роботи є достатнім. Кількість публікацій, обсяг, якість, повнота висвітлення результатів та розкриття змісту дисертації відповідають усім чинним вимогам до оприлюднення матеріалів дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. Зазначені публікації повною мірою висвітлюють основні наукові положення дисертації.

Спрямованість науково-практичних конференцій, де відбувалася апробація дисертаційного дослідження, характер статей, в яких відображено положення дисертації і результати проведених досліджень, повною мірою розкривають науково-практичну проблему, що зазначена в дисертації. Загалом вважаємо, що дисертація пройшла належну апробацію; вона є самостійною науковою працею та має завершений характер.

Відповідність змісту реферату основним положенням дисертації

Ознайомлення з текстом реферату дисертації дає підстави стверджувати, що за структурою та змістом він відповідає вимогам, що ставляться МОН України. У тексті реферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого Е.Ф. Наджафовим дисертаційного дослідження. Наголошено, що зміст реферату та основні положення дисертації є ідентичними.

Дискусійні положення та зауваження

Позитивно оцінюючи здобутки автора дисертації, вважаємо за необхідне зазначити наступні дискусійні положення та зауваження до поданої дисертаційної роботи:

1. На стор. 47 автор, посилаючись на роботу співробітників університету, стверджує, що «Електрокорозійні процеси відбуваються і на ділянках електрифікованих на змінному струмі, проте їх інтенсивність порівняно з постійним струмом набагато менша». Однак, з розвитком високошвидкісних залізниць вже з початку 1980-х років в усьому світі фіксується багаточисельні випадки блукаючої корозії, індукованої змінним струмом (<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103552>). На жаль, аналізуючи

роботу Bertolini L. [20], автор не звернув уваги на те, що ще у 2007 р. Bertolini L. стверджував «Постійний струм може викликати ініціацію корозії арматури в анодній зоні лише після того, як він циркулює протягом певного часу, який залежить від щільності анодного струму, наявності хлориду в бетоні та перебоїв у струмі. Змінний струм виявився набагато менш небезпечним, ніж постійний...» <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.05.048>

2. На стор. 48 автор стверджує «Вважають, що гелеві пори та мікрокапіляри практично недоступні для води». Це твердження здебільшого неточне, тому що гелеві пори, які є частиною цементного гелю, завжди заповнені водою (гелева вода) і відіграють ключову роль у процесах гідратації та формуванні властивостей цементного каменю. Вода в них є високо адсорбованою і її рухливість дуже обмежена, але вони аж ніяк не «недоступні для води». Навпаки, саме їхня наявність і заповнення водою є фундаментальною властивістю цементного гелю. Мікрокапіляри (приблизно 3-50 нм) також доступні для води і, як правило, заповнюються водою при нормальних умовах вологості. Вода в них рухома, але її рух може бути сповільнений через капілярні сили та розмір пор.
3. Також твердження (стор. 49), що «водопоглинання бетону достатньо точно характеризує поровий простір бетону саме щодо його проникності для газів, рідин та іонів», не є повністю вірним. Водопоглинання враховує тільки всі відкриті пори, а проникність (пермеабельність), насамперед, визначається розміром, розподілом і зв'язністю саме капілярних пор та макропор. Ці пори є «автострадами» для руху речовин. Наприклад, один зразок може мати багато дрібних пор (високе водопоглинання, низька проникність), а інший – менше, але більших і більш зв'язаних пор (схоже водопоглинання, але вища проникність).
4. В таблиці 2.1 на стор. 56 наведені стандартні значення вільної енергії Гіббса для $\text{Ca}(\text{OH})_2$ занижені, оскільки стандартне значення ΔG^0_{298} відповідає 897,4 кДж/моль. Відповідні посилання: <https://webbook.nist.gov/chemistry/> або https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Gibbs_free_energy_of_formation Тому при термодинамічних розрахунках в розділі 3 слід врахувати ці розбіжності.
5. На стор. 60 автор наводить формулу (2.6) для визначення реакційної ємності бетону m_o (cm^2/cm^2). Але на стор. 86 в формулі (3.2) m_o (cm^2/cm^2) це об'єм CO_2 , необхідний для утворення CaCO_3 . В 4 розділі на стор. 97 m_o (cm^3/cm^3) це вже реакційна здатність бетону. На наш погляд така вільна трактовка чітко визначеної величини, до якої відноситься реакційна здатність до карбонізації не допустима. По друге, не зрозуміло що за одиниці виміру, якщо реакційна ємність або реакційна здатність бетону, що відображає кількість гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або інших лужних компонентів, доступних для реакції з CO_2 вимірюється у масових або об'ємних одиницях, наприклад, у kg/m^3 або mole/m^3 .
6. Цікаво, за допомогою яких вимірювальних пристроїв автор мав змогу визначити просування фронту карбонізації в захисному шарі бетону в 0,5 мм. Людське око має обмежену здатність розрізняти такі малі зміни.

Однак, зазначені зауваження мають в основному рекомендаційний характер і не знижують практичну цінність дисертаційної роботи для підвищення довговічності та надійності опор контактних мереж.

Отримані результати можуть і повинні бути об'єктом подальших поглиблених теоретичних і експериментальних досліджень для розвитку отриманих знань і подальшого втілення їх у виробництво.

Загальний висновок

Дисертаційна робота на тему: «Бетонні опорні конструкції з неметалевим армуванням для ЛЕП і контактних мереж» виконана вперше і поглиблює існуючі знання в галузі будівельного матеріалознавства, а саме є суттєвим внеском до розкриття можливостей підвищення якості і довговічності опорних конструкцій.

Дисертація є завершеною, самостійно підготовленою кваліфікаційною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані та практично цінні результати, що вирішують важливу наукову проблему, яка полягає у підвищенні довговічності та надійності бетонних опорних конструкцій для ЛЕП і контактних мереж.

Враховуючі актуальність обраної теми дисертації, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, новизна та повнота викладу в опублікованих працях, вважаю, що дисертація Наджафова Ельшада Фаїг огли на тему: «Бетонні опорні конструкції з неметалевим армуванням для ЛЕП і контактних мереж» відповідає вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 261 від 23 березня 2016 року, наказу Міністерства освіти і науки № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та Порядку присудження ступеня доктора філософії а її автор – Наджафов Ельшад Фаїг огли заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор
кафедри архітектури та інженерних
вишукувань Сумського національного
аграрного університету



В.П. Сопов

