

Голові разової СБР із захисту
дисертації Пілюгіна Є.Д.
д.т.н., проф. Колосову Д.Л.
офіційного опонента
д.т.н., проф. Середи Б.П.

ВІДГУК

Офіційного опонента доктора технічних наук, професора, директора науково-дослідного центру «Матеріалознавства та інноваційних технологій» Дніпровського державного технічного університету, завідувача кафедри автомобілів та транспортно-логістичних систем ДДТУ **Середи Бориса Петровича** на дисертаційну роботу **Пілюгіна Євгенія Дмитровича** «Вплив структуроутворення міжфазних границь скло волоконних армуючих елементів на механічні та експлуатаційні властивості композитних будівельних конструкцій», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

Відгук складено на основі всебічного та критичного аналізу тексту дисертації, опублікованих здобувачем наукових праць, а також документів, що підтверджують реалізацію та впровадження результатів дослідження.

Загальна характеристика роботи. До розгляду подано дисертаційну роботу на здобуття ступеня доктора філософії, а також копії всіх опублікованих автором праць, що відображають зміст і результати дослідження. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 170 сторінок, у тому числі 48 рисунків та 14 таблиць. Список використаних джерел налічує 112 найменувань на 12 сторінках.

Тему дисертаційної роботи затверджено на засіданні Вченої ради Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

(протокол № 15 від 24 вересня 2025 року). Наукові керівники – доктор технічних наук, професор Лаухін Д.В. та кандидат технічних наук, доцент Федоряченко С.О.

Оцінка актуальності теми дисертації. Актуальність теми дисертаційної роботи не викликає сумнівів. Залізобетон залишається основним конструкційним матеріалом сучасного будівництва, а традиційне армування сталевими стержнями класу A500C, попри високі механічні характеристики, лишається вразливим до корозійного руйнування, що суттєво скорочує термін служби конструкцій та збільшує витрати на їх обслуговування і ремонт.

Скло волоконна (GFRP) арматура завдяки корозійній стійкості, малій питомій вазі та високій міцності на розтяг є перспективною альтернативою сталевому армуванню. Проте її широке впровадження стримується недостатньою вивченістю поведінки композитного армування в умовах термомеханічного навантаження, зокрема при пожежі, а також відсутністю відповідної вітчизняної нормативної бази. За цих умов робота, спрямована на встановлення кількісних закономірностей впливу структуроутворення міжфазних границь волокно – матриця на комплекс фізико-механічних властивостей армованих конструкцій, є актуальною як з наукового, так і з практичного та технологічного погляду.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, забезпечується коректним застосуванням сучасного комплексу методів дослідження: кількісного та якісного металографічного аналізу, растрової електронної мікроскопії із застосуванням енергодисперсійного рентгенівського аналізу (EDX), механічних випробувань, статистичного аналізу масивів експериментальних даних та чисельного моделювання методом скінченних елементів.

Заслугує на позитивну оцінку системність побудови дослідження: обидва типи армування вивчаються за єдиною методичною схемою: структура у стані поставки, поведінка при нагріванні за стандартною температурною кривою ISO 834, зміни елементного складу між фазних зон. Результати структурних досліджень, отримані незалежними методами (оптична металографія, растрова електронна мікроскопія, EDX – аналіз), взаємно узгоджуються, а сформульовані висновки не суперечать загальноприйнятим положенням матеріалознавства щодо фазових перетворень у сталях та термічної деструкції полімерних композитів.

Наукова новизна одержаних результатів. До найвагоміших наукових результатів роботи належать такі положення:

Вперше проведено комплексне порівняльне дослідження еволюції мікроструктури сталеві арматури A500C і скловолоконної арматури при нагріванні за стандартною кривою ISO 834, що дозволило встановити принципово відмінні механізми термічної деградації двох типів армування: сталева арматура зазнає повної втрати ефекту термомеханічного зміцнення, тоді як у скловолоконній арматурі відбувається незворотна термічна деструкція полімерного сполучного при збереженні геометрії та властивостей армувальних волокон.

Набули подальшого розвитку аналітичні моделі термомеханічної деградації властивостей скловолоконної арматури, у яких експоненційну функцію зниження модуля пружності поєднано з узагальненим конститутивним рівнянням, що враховує одночасний вплив температури, об'ємного вмісту волокон та циклічного навантаження.

Вперше на основі RVE-моделювання в середовищі ANSYS Material Designer визначено ефективні інженерні константи для дев'яти комбінацій скловолокно/матриця та встановлено раціональні діапазони об'ємного вмісту

волокон за критерієм мінімального розузгодження коефіцієнтів теплового розширення арматури й бетонної матриці.

Вперше методами скануючої електронної мікроскопії та EDX-аналізу кількісно охарактеризовано розподіл хімічних елементів на міжфазних границях волокно–матриця у трьох станах і встановлено зв'язок між карбонізацією полімерного сполучного та руйнуванням адгезійного шару як визначальним механізмом втрати механічних властивостей композиту при пожежному навантаженні. Останнє положення має, на мою думку, найбільшу наукову цінність, оскільки зміщує акцент у пошуку шляхів підвищення термостійкості композитної арматури з армувального волокна на полімерну матрицю.

Оцінка практичного значення результатів роботи. Практичне значення роботи полягає у створенні науково обґрунтованої бази для застосування скловолоконної арматури в залізобетонних конструкціях. Розроблено порівняльну базу даних фізико-механічних властивостей сталевих арматур А500С та дев'яти варіантів скловолоконної арматури, придатну для безпосереднього використання проектувальниками. Встановлені критичні температурні межі деградації скловолоконної арматури дозволяють обґрунтовано призначати товщину захисного бетонного шару та засоби вогнезахисту, а верифіковані скінченноелементні моделі – виконувати чисельну оцінку вогнестійкості конструкцій без повномасштабних вогневих випробувань.

Результати роботи впроваджено у виробничу діяльність ТОВ «Сінерджі Ер Енд Ді» та в освітній процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», що підтверджується відповідними актами впровадження.

Оцінка змісту й оформлення дисертації. Дисертаційна робота написана фаховою українською мовою з дотриманням наукового стилю та загальноприйнятої термінології, побудована в логічній послідовності відповідно до поставлених мети й завдань.

У першому розділі виконано ґрунтовний аналіз стану питання. Розглянуто застосування композитної арматури у вітчизняній та зарубіжній практиці, механічні властивості й довговічність FRP, вплив агресивних середовищ, сумісність із бетоном та вплив температури, а також стан нормативної бази (ACI 440, CSA S806, fib Bulletin 40, ISO 10406, ДСТУ 9065:2021, ДСТУ ISO 10406-1:2021). За результатами аналізу коректно поставлено наукові завдання дослідження.

Другий розділ присвячено матеріалам і методам досліджень. Обґрунтовано вибір об'єктів – термічно зміцненої сталеві арматури класу A500C та композитної скловолоконної арматури, наведено їх склад, структуру й технологію виготовлення, детально описано методики механічних, температурних і мікроструктурних досліджень та чисельного моделювання.

Третій розділ містить моделювання армованих бетонних конструкцій у термомеханічному полі. Побудовано аналітичні моделі термомеханічної та втомної деградації властивостей GFRP – арматури, виконано чисельне моделювання поведінки бетонного зразка за стандартною кривою ISO 834 та оцінено захисну функцію бетонного шару.

Четвертий розділ є найбільш насиченим експериментальним матеріалом. Установлено концентричну зональну будову термозміцненої арматури A500C у стані поставки, виконано порівняльні випробування на статичний стиск кубічних армованих бетонних зразків класу B30, досліджено вплив високотемпературного нагрівання на структуру та властивості обох типів арматури, а методами електронної мікроскопії й EDX – аналізу кількісно охарактеризовано зміни елементного складу міжфазних зон.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 9 наукових праць, у тому числі 4 статті у наукових фахових виданнях України категорії Б та 5 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях. Результати

пройшли широку апробацію на наукових форумах всеукраїнського та міжнародного рівнів. Кількість, зміст та обсяг опублікованих праць відповідають вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Відсутність порушень академічної доброчесності. Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на платформі Plag.ua (показник подібності – 13 %), ознайомившись із науковими публікаціями та текстом дисертації Пілюгіна Є.Д., відзначаю відсутність порушень академічної доброчесності. Використані концепції, результати та тексти інших авторів супроводжуються посиланнями на відповідні джерела.

Зауваження та дискусійні положення. Разом із загальною позитивною оцінкою роботи вважаю за необхідне висловити такі зауваження та побажання:

1. Запропонована аналітична модель зниження модуля пружності $E(T) = E_0 \cdot \exp(-\alpha(T-T_0))$ має емпіричний характер. У роботі не проведено її зіставлення з відомими моделями термічної деградації властивостей полімерних композитів, що дозволило б чіткіше окреслити її переваги та межі застосовності.

2. Механізм карбонізації полімерної матриці переконливо підтверджено даними EDX-аналізу. Водночас ці результати доцільно було б доповнити даними термічного аналізу (термогравіметрія, диференціальна скануюча калориметрія), які кількісно підтвердили б температурні інтервали деструкції сполучного.

3. У роботі встановлено, що визначальним чинником втрати властивостей є руйнування матриці, тоді як армувальні волокна зберігають склад і геометрію. З огляду на це бракує обговорення можливих шляхів підвищення термостійкості саме матриці та міжфазної границі (модифікація силановими зв'язуючими агентами, застосування термостійких смол) як перспективного напрямку подальших досліджень.

4. Дискусійним залишається питання: яким чином установлені у роботі критичні температури деградації скло волоконної арматури співвідносяться з нормованими класами вогнестійкості будівельних конструкцій (R30, R60 тощо) та як їх практично враховувати при проектуванні?

5. Потребує пояснення встановлена практична рівноцінність міцності зразків на осьовий стиск за принципово різних властивостей армування: чи зумовлена вона винятково визначальною роллю бетонної матриці, чи також обраною схемою та ступенем армування зразків?

6. У тексті трапляються поодинокі неточності, які, втім, не впливають на зміст роботи. Так на стор.30 не має позначення, що відноситься до якого рисунка, на стор. 35 ілюстрація рис.2 наведена в першому розділі роботи, подається за відсутності посилання на інформаційні джерело, на стор. 100 відсутнє позначення збільшення на мікроструктурах.

Висловлені зауваження не є визначальними, не знижують загальної наукової новизни та практичної значущості одержаних результатів і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок щодо дисертаційної роботи. Вважаю, що дисертаційна робота Пілюгіна Євгенія Дмитровича «Вплив структуроутворення міжфазних границь скло волоконних армуючих елементів на механічні та експлуатаційні властивості композитних будівельних конструкцій» є завершеним самостійним науковим дослідженням, яке вирішує актуальне науково-прикладне завдання розширення областей застосування скловолоконної арматури у бетонних конструкціях шляхом встановлення взаємозв'язку між структуроутворенням міжфазних границь волокно – матриця, елементним складом компонентів та комплексом механічних і експлуатаційних властивостей армованих конструкцій в умовах термомеханічного навантаження.

Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною та практичною цінністю повністю відповідає вимогам, передбаченим наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор Пілюгін Євгеній Дмитрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

Офіційний опонент:

директор науково-дослідного центру

«Матеріалознавства та інноваційних технологій» ДДТУ,

завідувач кафедрою автомобілів та

транспортно-логістичних систем

Дніпровського державного технічного університету

доктор технічних наук, професор _____

Борис СЕРЕДА