

*Голові разової СВР із захисту
дисертації Пілюгіна Є.Д.
проф. Колосову Д.Л.
рецензента
к.т.н., доц. Козечко В.А.*

ВІДГУК

рецензента, кандидата технічних наук, доцента кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» **Козечко Вікторії Анатоліївни** на дисертаційну роботу **Пілюгіна Євгенія Дмитровича** «Вплив структуроутворення міжфазних границь скловолоконних 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.

Актуальність обраної теми досліджень. Армовані бетонні конструкції залишаються основним конструктивним матеріалом сучасного будівництва, а традиційне армування сталевими стержнями класу А500С, попри високі механічні характеристики, залишається вразливим до корозійного руйнування. Це скорочує термін служби конструкцій та зумовлює значні витрати на технічне обслуговування і ремонт, особливо для об'єктів, що експлуатуються в агресивних середовищах.

Скловолоконна арматура є обґрунтованою альтернативою завдяки корозійній стійкості, малій питомій вазі та високій міцності на розтяг. Разом з тим чинна нормативна документація не містить достатньо обґрунтованих вимог щодо її

застосування в умовах термомеханічного навантаження, зокрема при пожежі. Кількісні залежності між структурою міжфазних границь волокно - матриця та комплексом фізико-механічних властивостей композиту в широкому температурному діапазоні залишаються вивченими недостатньо.

Саме на заповнення цієї наукової задачі спрямована рецензована робота. Здобувач послідовно порівнює два типи армування - термічно зміцненої сталевій арматури класу A500C та композитної скловолоконної арматури - за єдиною схемою: структура у стані поставки, поведінка при нагріванні за стандартною кривою ISO 834, зміни елементного складу міжфазних зон та перехідних зон. Такий підхід дозволяє отримати не окремі характеристики, а зіставні дані про механізми деградації, що мають безпосереднє прикладне значення для оцінки вогнестійкості конструкцій.

Ураховуючи потреби будівельного фонду України та необхідність даних в нормативній базі щодо композитного армування, тема дисертаційного дослідження Пілюгіна Є.Д. є актуальною як з наукового, так і з практичного погляду.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Тему дисертаційної роботи затверджено на засіданні Вченої ради Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (протокол № 15 від 24 вересня 2025 року).

Результати досліджень увійшли та були прийняті до уваги при оновленні освітньо-наукової програми підготовки докторів філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство». Крім того, результати наукових досліджень увійшли до навчально-методичних розробок для підготовки магістрів спеціальності 132 Матеріалознавство, а саме:

1. Кваліметрія та контроль якості матеріалів і виробів [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для здобувачів ступеня магістра спеціальності 132 Матеріалознавство / уклад.: З.В. Сазанішвілі, Є.Д.

Пілюгін, О.В. Федоскіна ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2025.

2. Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для здобувачів ступеня магістра спеціальності 132 Матеріалознавство / уклад.: З.В. Сазанішвілі, Д.В. Лаухін, Є.Д. Пілюгін ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2025.

3. Сучасні методи дизайну [Електронний ресурс] : методичні рекомендації щодо використання растрової графіки при виконанні лабораторних робіт для здобувачів ступеня бакалавра всіх спеціальностей / уклад.: І.В. Вернер, Є.Д. Пілюгін ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». - Дніпро : НТУ «ДП», 2025. - 59 с.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, характеризуються достатнім ступенем обґрунтованості, що забезпечено поєднанням взаємодоповнювальних методів дослідження: кількісного та якісного металографічного аналізу, скануючої електронної мікроскопії з енергодисперсійним рентгеноспектральним аналізом, механічних випробувань, статистичного аналізу експериментальних даних та чисельного моделювання методом скінченних елементів.

Особливо слід відзначити методичну коректність структурних досліджень. Мікроструктуру арматури досліджено у трьох станах - у стані поставки, після 28-добової витримки у складі бетонних зразків та після нагрівання до 1000 °С, - що дозволяє відокремити вплив лужного середовища бетону від впливу високої температури. Результати оптичної металографії підтверджено даними растрової електронної мікроскопії, а якісні спостереження - кількісними даними енергодисперсійного аналізу, виконаного у трьох режимах: точковому, у вигляді лінійного профілю та картування розподілу елементів.

Достовірність висновків щодо термічної деградації сталеві арматури підтверджується узгодженістю структурних даних із загальноприйнятими уявленнями про розпад аустеніту: встановлене заміщення вихідної мартенситно-бейнітної будови рівноважною ферито-перлітною структурою з укрупненими зернами при незмінному хімічному складі ($\text{Fe } 86\text{--}91\%$, $\text{Mn} \leq 0,62\%$) не суперечить відомим закономірностям і логічно пояснює зафіксоване зниження міцності.

Результати чисельного моделювання зіставлені з даними експериментальних випробувань, наукові положення не суперечать загальноприйнятим уявленням матеріалознавства.

Наукові положення і результати, що виносяться на захист. Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

1. 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 - вихідна тризонна мартенситно-бейнітна будова з двома проміжними шарами заміщується рівноважною ферито-перлітною структурою з укрупненими зернами при збереженні хімічного складу та конструктивної цілісності; скловолоконна арматура втрачає здатність до спільної роботи волокон і матриці внаслідок незворотної термічної деструкції полімерного сполучного при збереженні геометрії та механічних характеристик армувальних волокон, що визначає принципово різну пожежну поведінку цих матеріалів у армованих бетонних конструкціях.

2. Набули подальшого розвитку аналітичні моделі термомеханічної деградації властивостей скловолоконної арматури шляхом поєднання експоненційної функції зниження модуля пружності $E(T) = E_0 \cdot \exp(-\alpha(T-T_0))$ з узагальненим конститутивним рівнянням, що враховує одночасний вплив температури, об'ємного вмісту волокон V_f та циклічного навантаження; встановлено, що параметр деградації α суттєво

залежить від типу матриці та визначається температурою склування T_g (120-230 °C для вінілестеру, бензоксазину та епоксиду відповідно), а критичний поріг інтенсивного зниження жорсткості відповідає діапазону $T = 0,8-1,0 \cdot T_g$.

3. Вперше на основі репрезентативного моделювання в ANSYS Material Designer визначено ефективні інженерні константи (E , G , ν , KTP , теплопровідність) для дев'яти комбінацій скловолокно/матриця (E/AR/S-скло $\times$ вінілестер/бензоксазин/епоксид) при об'ємному вмісті волокон та температурах 20-230 °C, що створює науково обґрунтовану базу для вибору раціонального складу скловолоконної арматури.

4. Набуло подальшого розвитку встановлення діапазонів раціонального об'ємного вмісту волокон - 17-32 % для AR- та E-скла і 17 % для S-скла - за критерієм мінімального розузгодження коефіцієнтів теплового розширення скловолоконної арматури та бетонної матриці, що забезпечує збереження адгезійного з'єднання при термомеханічному навантаженні.

5. Вперше методами скануючої електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу (точковий, лінійний профіль та картування елементів) кількісно охарактеризовано розподіл хімічних елементів на міжфазних границях волокно–матриця у скловолоконній арматурі в трьох станах: у стані поставки (Si 26-33 %, Ca 17-22 %, Al 6-8 % у зонах волокон; C > 73 % у зонах матриці), після 28-добової витримки у складі бетонних зразків (розподіл Si, Ca, Al та C залишається незмінним - деградації міжфазної зони не виявлено) та після нагрівання до 1000 °C (вміст вуглецю у зонах матриці зростає до 54-77 %, O - до 36-42 %), що дозволило кількісно встановити зв'язок між карбонізацією полімерного сполучного та руйнуванням волокно–матриця як визначального механізму втрати властивостей композиту при пожежному навантаженні.

Оцінка змісту роботи та повнота викладення результатів у публікаціях. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 170

сторінок, у тому числі 48 рисунків та 14 таблиць. Список використаних джерел містить 112 найменувань на 12 сторінках.

У першому розділі виконано комплексний аналіз стану питання та поставлено завдання дослідження. Розглянуто застосування композитної арматури у зарубіжній практиці, механічні властивості та довговічність FRP, вплив агресивних середовищ, сумісність з бетоном та вплив температури на арматурні матеріали. Проаналізовано стан нормативної бази - міжнародних стандартів (ACI 440, CSA S806, fib Bulletin 40, ISO 10406) та вітчизняних документів (ДСТУ 9065:2021, ДСТУ ISO 10406-1:2021). За результатами аналізу обґрунтовано, що недостатньо вивченими залишаються кількісні зв'язки між параметрами мікроструктури міжфазних границь волокно - матриця та інженерними константами в широкому температурному діапазоні.

Другий розділ присвячено матеріалам і методам досліджень. Обґрунтовано вибір об'єктів - сталеві арматури періодичного профілю класу A500C та композитної скловолоконної арматури аналогічного діаметра. Наведено склад, структуру і технологію виготовлення обох типів арматури, описано методики механічних випробувань, чисельного моделювання в ANSYS, випробувань залізобетонних зразків на статичний стиск, температурних випробувань, а також оптичної та растрової електронної мікроскопії.

Третій розділ містить моделювання армованих бетонних конструкцій у термомеханічному полі. Побудовано аналітичні моделі термомеханічної та втомної деградації властивостей скловолоконної арматури, виконано чисельне моделювання поведінки бетонного зразка з композитним армуванням за стандартною кривою ISO 834. Показано, що бетонний захисний шар товщиною 20 мм забезпечує сповільнення прогріву арматури, проте критична температура деградації скловолоконної арматури досягається раніше, ніж критична температура для сталі (500–600 °C), що обумовлює використання конструкцій з полімерним армуванням в підземних паркінгах, фундаментах та колонах нульового поверху.

Четвертий розділ є основним за обсягом експериментального матеріалу. Досліджено структуроутворення за перерізом термозміцненої арматури класу А500С у стані поставки: встановлено тризонну концентричну будову поперечного перерізу, у якій три основні структурні зони розділені двома проміжними шарами (загалом п'ять структурних зон А–Д). Зовнішню основну зону «А» товщиною близько 1,2 мм утворює відпущений мартенсит; проміжний шар «Б» завширшки приблизно 0,6 мм характеризується поєднанням відпущеного мартенситу та окремих ділянок бейніту; в основній зоні «В» переважає верхній бейніт; у проміжному шарі «Г» з'являється перлітна складова в кількості до 10 %; центральну основну зону «Д» представлено сумішшю бейніту, перліту та доєвтектоїдного фериту. Запропоновано розрахункове співвідношення $h = \frac{1}{2}R_{ст}$ як критерій оцінювання ефективності термічного зміцнення відповідно до вимог ДСТУ 3760:2006.

Структуру композитної арматури у стані поставки виявлено як однорідну, з рівномірно розподіленими волокнами діаметром 19–38 мкм у полімерній матриці, без ознак зональності та залишкових дефектів міжфазних границь.

Виконано порівняльні випробування на статичний стиск кубічних зразків бетону класу В30 розміром 100×100×100 мм трьох серій. Встановлено, що тип центрально розташованого армувального елемента впливає на міцність бетону при осьовому стиску: середня міцність склала 39,3 МПа (без арматури), 40,5 МПа (сталева арматура А500С) та 41,23 МПа (скловолоконна арматура), розкид не перевищує 3 %. Характер руйнування бетону у всіх серіях ідентичний - розвиток системи наскрізних тріщин із відколюванням фрагментів по бічних гранях.

Значну частину розділу присвячено дослідженню впливу нагрівання. Показано, що сталева арматура А500С повністю втрачає ефект термомеханічного зміцнення внаслідок аустенітизації та формування рівноважної ферито-перлітної структури з укрупненими зернами, зберігаючи при цьому конструктивну цілісність. Композитна арматура зазнає незворотної карбонізації полімерної матриці: вміст вуглецю в зонах матриці зростає до 54–77 %, кисню — до 36–42 %, концентрації Si

та Са падають нижче 2 %, тоді як армувальні волокна зберігають геометрію та елементний склад (Si 24–27 %, Са 16–18 %, Al 5–7 %). Саме це, як обґрунтовано в роботі, призводить до повної втрати міжфазного зчеплення та здатності компонентів до спільної роботи.

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 доповідалися на 2nd та 3rd International Scientific and Practical Conference «Development and Design of Modern Materials and Products» (м. Дніпро, 2023 та 2024 рр.), XV та XVI Міжнародних науково-технічних конференціях аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» (м. Дніпро, 2025 та 2026 рр.), Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми механіки у конструкціях спеціального призначення» (м. Дніпро, 2025 р.). Кількість, зміст та обсяг опублікованих праць відповідають вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Значення роботи для науки, практики та суспільства. Наукове значення роботи полягає у встановленні кількісного зв'язку між структурою міжфазних границь волокно-матриця, елементним складом компонентів та комплексом фізико-механічних властивостей композитного армування в широкому діапазоні температур. Принциповим є доведення того, що визначальним механізмом втрати механічних властивостей скловолоконної арматури при пожежному навантаженні є не руйнування армувальних волокон, а карбонізація полімерного сполучного та подальше руйнування адгезійного шару.

Практичне значення одержаних результатів полягає в такому. Розроблено порівняльну базу даних фізико-механічних властивостей сталевोї арматури А500С та раціональних варіантів скловолоконної арматури, яка може бути безпосередньо використана проєктувальниками при виборі типу армування залежно від умов експлуатації. Встановлені критичні температурні межі деградації скловолоконної

арматури ($T_g \approx 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ — початок розм'якшення матриці; $200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ — критичне зниження несучої здатності) дозволяють обґрунтовано призначати товщину захисного бетонного шару та засоби вогнезахисту. Верифіковані моделі методом скінчених елементів можуть застосовуватися проєктними організаціями для чисельної оцінки вогнестійкості залізобетонних елементів без проведення повномасштабних вогневих випробувань. Результати енергодисперсійного аналізу міжфазних границь можуть бути використані виробниками композитної арматури для вдосконалення технологій виготовлення.

Сформульовано конкретні практичні рекомендації: використання комбінації AR-скло/бензоксазин з $V_f = 20\text{--}25\%$ як оптимальної за критеріями термомеханічної сумісності з бетоном та вогнестійкості; забезпечення збільшеного захисного шару бетону ($\geq 30\text{ мм}$) для конструкцій з підвищеними вимогами до вогнестійкості; урахування в нормативних документах критичного температурного порогу деградації скловолоконної арматури на рівні $0,8 \cdot T_g$ матриці як граничного стану при розрахунку вогнестійкості.

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.

Відсутність порушення академічної доброчесності. Розглянувши звіт подібності, сформований за результатами перевірки дисертаційної роботи на платформі Plag.ua (показник подібності — 13%), дійшла висновку, що дисертаційна робота Пілюгіна Євгенія Дмитровича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації. Використані концепції, результати та тексти інших авторів супроводжуються належними посиланнями на відповідні джерела.

Зауваження та дискусійні положення.

1. Робота містить значну кількість англомовних аббревіатур (GFRP, FRP, RVE, EDX, CDP, TRC, SDC). Доцільно було при першому згадуванні кожної подавати

повне розшифрування українською, а також винести перелік умовних скорочень окремим списком на початку дисертації.

2. У підрозділах 4.6–4.9 наведено велику кількість електронно-мікроскопічних знімків та карт енергодисперсіонного аналізу, проте частина рисунків має недостатньо інформативні підписи — без зазначення збільшення та режиму зйомки, що ускладнює сприйняття ілюстративного матеріалу.

3. У тексті паралельно вживаються терміни «скловолоконна арматура», «композитна арматура» та «склопластикова (GFRP) арматура» як синоніми. Бажано уніфікувати термінологію або окремо обумовити їх тотожність.

4. Список використаних джерел містить переважно іноземні публікації; водночас частина посилань має давність понад десять років, що варто було врахувати при доборі літератури.

Зазначені зауваження мають переважно уточнювальний характер, не спростовують отриманих наукових результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок щодо дисертаційної роботи. Дисертаційна робота Пілюгіна Є.Д. написана грамотною фаховою українською мовою, побудована логічно, містить достатню кількість ілюстративного матеріалу та додатків, що свідчить про її цілісність і завершеність. Отримані наукові результати мають належний рівень новизни, а сформульовані висновки обґрунтовані результатами експериментальних досліджень та чисельного моделювання.

Вважаю, що дисертаційна робота Пілюгіна Євгенія Дмитровича на тему «Вплив структуроутворення міжфазних границь скловолоконних 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 в бетонних конструкціях на основі встановлення

взаємозв'язку між структуроутворенням міжфазних границь волокно–матриця та комплексом механічних і експлуатаційних властивостей армованих конструкцій.

Робота відповідає вимогам, передбаченим наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), а також пп. 6, 7, 8 «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.

Здобувач Пілюгін Євгеній Дмитрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент

кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства

Національного технічного університету

«Дніпровська політехніка»

Вікторія КОЗЕЧКО