

Рішення
разової спеціалізованої вченої ради
про присудження ступеня доктора філософії

Здобувач ступеня доктора філософії — Євгеній ПІЛЮГІН, 1998 року народження, громадянин України, освіта — вища: у 2022 році закінчив Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство», з 2022 року — аспірант кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро.

Разова спеціалізована вчена рада утворена рішенням Вченої ради Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», МОН України, м. Дніпро від «10» липня 2026 року, протокол № 19, наказ від «10» липня 2026 року № 119 у складі:

Голова разової ради: Колосов Дмитро Леонідович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри механічної та біомедичної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Рецензенти:

1. Козечко Вікторія Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;

2. Слупська Юлія Сергіївна, доктор філософії, доцент, доцент кафедри механічної та біомедичної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Офіційні опоненти:

1. Середа Борис Петрович, доктор технічних наук, професор, директор науково-дослідного центру «Матеріалознавство та інноваційні технології», завідувач кафедри автомобілів та транспортно-логістичних систем Дніпровського державного технічного університету;

2. Вахрушева Віра Сергіївна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів навчально-наукового інституту «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій.

Відомості про членів разової спеціалізованої вченої ради додаються.

На засіданні від 14 серпня 2026 року разова спеціалізована вчена рада прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 13 «Механічна інженерія» Євгенію Пілюгіну на підставі відкритого публічного захисту дисертації «Вплив структуроутворення міжфазних границь скловолоконних армуючих елементів на механічні та експлуатаційні властивості композитних будівельних конструкцій».

Дисертацію виконано на кафедрі конструювання, технічної естетики і дизайну у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка», МОН України, м. Дніпро.

Наукові керівники:

Федоряченко Сергій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної, навчально-виховної роботи та перспективного розвитку Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;

Лаухін Дмитро Вячеславович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Дисертацію подано у вигляді спеціально підготовленого рукопису українською мовою.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу, яка полягає у встановленні закономірностей структуроутворення міжфазних границь та кількісних взаємозв'язків між параметрами мікроструктури і термомеханічними властивостями сталевोї та скловолоконної арматури, розробленні розрахункових моделей і практичних рекомендацій, спрямованих на вирішення прикладних завдань обґрунтованого вибору раціонального складу та умов застосування композитної скловолоконної арматури в армованих бетонних конструкціях при нормальних і підвищених температурах.

Наукова новизна роботи:

1. Вперше проведено комплексне порівняльне дослідження еволюції мікроструктури сталевої арматури А500С 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 при збереженні хімічного складу та конструктивної цілісності, тоді як скловолоконна арматура втрачає здатність до спільної роботи волокон і матриці внаслідок незворотної термічної деструкції полімерного сполучного при збереженні геометрії та механічних характеристик армувальних волокон.

2. Набули подальшого розвитку аналітичні моделі термомеханічної деградації властивостей скловолоконної арматури шляхом поєднання експоненційної функції зниження модуля пружності з узагальненим конститутивним рівнянням, що враховує одночасний вплив температури, об'ємного вмісту волокон та циклічного навантаження; встановлено, що критичний поріг інтенсивного зниження жорсткості відповідає діапазону 0,8–1,0 температури склування матриці.

3. Вперше на основі RVE-моделювання в ANSYS Material Designer визначено ефективні інженерні константи для дев'яти комбінацій «скловолокно–матриця» при об'ємному вмісті волокон 10–70 % та температурах 20–230 °С, що створює науково обґрунтовану базу для вибору раціонального складу скловолоконної арматури.

4. Набуло подальшого розвитку встановлення раціональних діапазонів об'ємного вмісту волокон за критерієм мінімального розузгодження коефіцієнтів

теплового розширення скловолоконної арматури та бетонної матриці, що забезпечує збереження адгезійного з'єднання при термомеханічному навантаженні.

5. Вперше методами сканувальної електронної мікроскопії та EDX-аналізу кількісно охарактеризовано розподіл хімічних елементів на міжфазних границях волокно–матриця у трьох станах — у стані поставки, після витримки у складі бетонних зразків та після нагрівання до 1000 °С, що дозволило встановити зв'язок між карбонізацією полімерного сполучного та руйнуванням адгезійного шару як визначальним механізмом втрати механічних властивостей композиту при пожежному навантаженні.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджено у виробничу діяльність ТОВ «Сінерджі Ер Ен Ді» та освітній процес НТУ «Дніпровська політехніка», що підтверджується відповідними актами, наведеними в дисертаційній роботі. Результати досліджень використані при обґрунтуванні раціонального складу армувального елемента за критеріями термомеханічної сумісності з бетонною матрицею та при визначенні впливу підвищених температур на деградацію механічних властивостей полімерної матриці й стан міжфазної границі волокно–матриця.

Отримано аналітичні залежності для розрахунку критичної температури деградації міжфазної границі скловолоконної арматури, раціонального об'ємного вмісту волокна за критерієм термомеханічної сумісності з бетоном та ефективних інженерних констант композитних матеріалів на основі дев'яти комбінацій «скловолоконно–матриця», що враховують тип волокна, тип полімерної матриці, температуру нагрівання та об'ємний вміст армувального наповнювача.

Результати дисертаційної роботи надають можливість підвищення достовірності прогнозування залишкової несучої здатності армованих бетонних конструкцій із композитним армуванням в умовах підвищеного температурного впливу, обґрунтованого вибору раціонального складу скловолоконної арматури, удосконалення методики розрахунку вогнестійкості конструкцій із полімерним армуванням та підвищення надійності проєктних рішень при їх застосуванні.

За результатами виконаних досліджень опубліковано 9 наукових праць, зокрема 4 статті у фахових наукових виданнях з переліку МОН України та 5 публікацій у матеріалах закордонних і всеукраїнських конференцій.

1. Пілюгін Є.Д., Ротт Н.О. Перспективи застосування композитної арматури в будівельній галузі // Вісник ХНАДУ. – 2024. – №107. – С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.62>.

2. Пілюгін Є.Д., Ротт Н.О. Вплив температури на поведінку композито-бетону: чисельне моделювання // Вісник ХНАДУ. – 2025. – №110. – С. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.110.0.24>.

3. Пілюгін Є.Д. Methodological principles for selecting glass fiber composite materials in reinforced structures // Збірник наукових праць НТУ «ДП». – 2025. – №83. – С. 183–191. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.183>.

4. Piliuhin Y.D. Comprehensive modeling of the properties of glass fiber reinforced polymer reinforcement in concrete elements under thermal and cyclic loading //

Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. – 2026. – №40. – С. 226–236. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-014>.

5. Пілюгін, Є. Д., Ротт, Н. О., Бодряхо, Є. А. (2023). Effect of the use of hard round polymer rods reinforced with fiberglass on the strength and durability of concrete structures. Розробка та дизайн сучасних матеріалів та виробів: збірник наукових праць II міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, Україна, 9–10 листопада 2023 р.) (с. 66–67). URL: https://okmm.nmu.org.ua/en/files/2023/DDMMP_2023.Conference_Proceedings.pdf

6. Пілюгін, Є. Д., Ротт, Н. О. (2024). Prospects for the application of composite reinforcement in the construction industry. Розробка та дизайн сучасних матеріалів та виробів: збірник наукових праць III міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, Україна, 26–27 листопада 2024 р.) (с. 110–112). URL: <https://okmm.nmu.org.ua/ua/files/2024/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%202024.pdf>

7. Пілюгін, Є. Д. (2025). Перспективи застосування композитної неметалевої арматури на основі склоровінгу в будівельній галузі. Наукова весна 2025: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих учених (м. Дніпро, Україна, 26–28 березня 2025 р.) (с. 429–430). URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2025/Scientific_Spring_2025.pdf

8. Пілюгін, Є. Д., Ротт, Н. О. (2025). До методики експерименту дослідження розподілу температури у середовищі з особливостями. Сучасні проблеми механіки у конструкціях спеціального призначення: збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, Україна, 26–28 березня 2025 р.) (с. 252–254). URL: https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum_Mechanic/Zbirnyk_19_05-01.pdf

9. Пілюгін, Є. Д., Лаухін, Д. В. (2026). Структурні особливості будови міжфазних границь між матрицею та волокнами в композитній арматурі. Наукова весна 2026: матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих учених (м. Дніпро, Україна, 4–6 березня 2026 р.) (с. 537–538). URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2026/Scientific_Spring_2026.pdf

У дискусії взяли участь голова і члени разової спеціалізованої вченої ради та присутні на захисті фахівці.

Рецензент, доцент Вікторія Козечко.

Запитання. Чому для моделювання та експерименту використовували різні полімерні матриці?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. У дисертації розрахункова та експериментальна частини мають дещо різні завдання, тому в них розглядаються різні матриці.

Під час моделювання було досліджено дев'ять комбінацій «скловолокно–матриця». Основною метою було порівняти різні варіанти та визначити, які з них є найбільш перспективними з точки зору термомеханічної сумісності з бетоном. Найкращі результати показала бензоксазинова матриця, зокрема завдяки високій

температурі склування — близько 180–230 °С, тоді як для вінілестеру вона становить приблизно 120 °С. Тому бензоксазинову матрицю в роботі рекомендовано як перспективний напрям подальших досліджень.

В експериментальній частині завдання було іншим. Тут досліджувалася промислово виготовлена скловолоконна арматура, тобто матеріал, який реально використовується в будівництві. Для такої арматури поширеною є саме вінілестерна матриця, оскільки вона має достатню лугостійкість і є економічно доцільною. Бензоксазинові смоли сьогодні більше застосовуються у високотехнологічних галузях і серійно для будівельної арматури практично не використовуються.

Тому експериментальна частина досліджує реально доступний матеріал, а результати цього дослідження (зокрема методика верифікації теплової моделі та встановлені механізми деградації) підтверджують адекватність тієї самої розрахункової методики, яка застосована й до бензоксазинових систем. Рекомендація щодо переходу на бензоксазинову матрицю — це обґрунтований напрям для подальшого розвитку виробництва композитної арматури, а не твердження, що досліджений зразок вже є оптимальним.

Запитання. Чому для структурних досліджень обрано нагрівання до 1000 °С?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Температуру 1000 °С було обрано для того, щоб дослідити обидва матеріали — сталеву та скловолоконну арматуру — в однакових температурних умовах і мати можливість коректно порівняти отримані результати.

Для сталевих арматур А500С така температура дозволяє повністю усунути ефект попереднього термомеханічного зміцнення. При нагріванні до 900–1000 °С відбувається аустенітизація сталі, а після подальшого охолодження формується ферито-перлітна структура. Тобто ми отримуємо кінцевий стан структурних змін сталевих арматур після високотемпературного впливу.

Для скловолоконної арматури температура 1000 °С, звичайно, значно перевищує робочий температурний діапазон полімерної матриці. У цьому випадку такий режим розглядався як граничний сценарій, за якого відбувається практично повна деградація матриці. Це дозволило порівняти вихідний матеріал із його кінцевим станом після максимального температурного впливу.

При цьому погоджуюсь, що додаткові дослідження за проміжних температур — наприклад, 120, 200, 250, 400 та 600 °С — дали б значно більше інформації про те, як саме відбувається поступова деградація полімерної матриці та міжфазної границі.

Тому дослідження проміжних температур, а також застосування термогравіметричного аналізу та диференціальної сканувальної калориметрії я розглядаю як напрям подальших досліджень.

Професор Дмитро Колосов.

Вікторіє Анатоліївно, чи задоволені Ви відповідями здобувача?

Доцент Вікторія Козечко.

Так, цілком задоволена.

Рецензент, доцент Юлія Слупська.

Запитання. До слайда 25: чому на знімку зображено 6 точок спектрів EDX, а самих графіків — 4? Що означають інші точки і чому їх не винесено на слайд?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. На слайді зображено знімок, на якому позначено 6 точок спектрів, розподілених по ділянках, що нас цікавили. Найвагоміші графіки винесено на слайд; ще дві точки — це дублювання попередніх, а також ділянка, де на графіку нічого не відобразилося, що підтверджує наявність порожнини.

Запитання. Наскільки результати можна поширити на інші види GFRP-арматури?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Дисертація встановлює насамперед фізичні механізми термічної деградації (карбонізація матриці, збереження геометрії волокон, руйнування міжфазного зчеплення) та валідовану методологію їх кількісної оцінки (RVE-моделювання, EDX-картування, верифікована теплова модель) — тому межі застосовності варто розглядати окремо для механізму й окремо для конкретних числових значень.

Щодо інших діаметрів стрижнів. Механізм деградації міжфазної границі — це явище мікрорівня (масштаб волокна й матриці), яке практично не залежить від макродіаметра стрижня, тому якісно він має відтворюватися для будь-якого діаметра. А от кількісний результат — час досягнення критичної температури — прямо залежить від діаметра через товщину захисного шару й теплову інерцію перерізу; проте сама розрахункова МСЕ-модель є параметричною і дозволяє перерахувати цей час для будь-якого діаметра без повторення експерименту.

Щодо інших виробників. Тут обмеження є найсуттєвішим: конкретні порогові температури й швидкість карбонізації залежать від рецептури смоли — наявності наповнювачів та антипіренів. У нашому випадку виявлено, зокрема, домішку алюмінієвого наповнювача в матриці, яка є комерційною таємницею виробника й варіюється.

Запитання. Чому обрано 9 комбінацій скловолоконної арматури, чим це обґрунтовано?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Для побудови репрезентативного об'єму було обрано 3 типи скловолокон, які нині використовуються для виготовлення скловолоконної арматури, і три типи матриць, де епоксидна та вінілестерна смоли застосовуються у виробництві, а бензоксазинова була обрана як перспективний напрям для впровадження. На основі цих компонентів було створено дев'ять комбінацій.

Поліефірні смоли свідомо не розглядалися через низьку лугостійкість і невисоку температуру склування — вони й так непридатні для арматури, що працює в бетоні.

Професор Дмитро Колосов.

Юліє Сергіївно, чи задоволені Ви відповідями здобувача?

Доцент Юлія Слупська.

Так, цілком задоволена.

Офіційний опонент, професор Борис Середа.

Запитання. Ви у своїй розповіді багато говорили про мартенситну структуру. Яка саме мартенситна структура у вас, адже мартенсит буває двох типів?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за уточнення. У поверхневій зоні термозміцненої арматури А500С формується пакетний мартенсит, а не пластинчастий.

Запитання. Ви багато розповіли про переваги застосування цієї арматури, але вона має й чимало недоліків: це насамперед низький модуль пружності, обмежена термостійкість, неможливість зварювання (з'єднання лише заклепками або склеюванням), руйнівна дія ультрафіолету на сонці. І останнє: сталеву арматуру принаймні можна здати на металобрухт, а скловолоконна складна у переробці та утилізації. Як у роботі ви враховуєте ці недоліки?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Так, скловолоконна арматура справді має свої недоліки, найголовніший з них — температурні межі використання, і саме це питання нас цікавило. Перспективним напрямом є впровадження у виробництво різних смол як матриць: навіть у наших розрахунках ми використовували бензоксазинову смолу, яка масштабно не застосовується у виробництві через свою вартість. Щодо ультрафіолету — він діє на арматуру негативно, проте час перебування на відкритому повітрі суттєво не впливає на арматуру завдяки додаванню в смолу додаткових модифікаторів. Щодо утилізації, то це питання справді стоїть доволі гостро, і не тільки в Україні; у нас є розуміння, як можна здійснювати рециклінг, і в майбутньому плануються дослідження в цьому напрямі.

Запитання. У вас є такий аналіз, як EDX. Чому ви обрали саме цей метод?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Мене цікавив саме розподіл хімічних елементів у зоні контакту скловолокна і матриці, а також розподіл характеристичного випромінювання. Саме для цього ми виконали лінійний EDX-аналіз на арматурі у стані поставки та на арматурі, яка була піддана температурному впливу, і порівняли ці зони контакту.

Професор Дмитро Колосов.

Борисе Петровичу, чи задоволені Ви відповідями здобувача?

Професор Борис Серєда.

Так, цілком задоволений.

Офіційний опонент, професор Віра Вахрушева.

Запитання. Який ви як фахівець бачите подальший напрям цих досліджень, куди рухатися далі?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Рухатися справді є куди: навіть у межах цієї роботи залишається багато напрямів, які можна дослідити, а також можна працювати у спільному напрямі з базальтопластиковою арматурою. Нині в Україні виробництво композитної арматури є в багатьох містах, тому впровадження наших наукових досліджень та розробок буде доцільним.

Запитання. Наскільки економічно зростає вартість арматури з використанням композитних матеріалів?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Використання композитної арматури є економічно доцільним за умови її виробництва поблизу об'єкта будівництва, тобто в межах міста або області, інакше через логістику вартість зростатиме. Саме виробництво композитної арматури вже перебуває на тому самому рівні, що й сталевій, за однакових характеристик.

Професор Дмитро Колосов.

Віро Сергіївно, чи задоволені Ви відповідями здобувача?

Професор Віра Вахрушева.

Так, цілком задоволена.

Голова, професор Дмитро Колосов.

Запитання. На вашу думку, яка принципова відмінність запропонованого вами методу дослідження від того, що вже відомо?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Якщо коротко — принципова відмінність не в тому, що застосовано якийсь абсолютно новий інструмент, а в тому, що відомі методи вперше поєднано в єдину методологію, там де традиційно кожен рівень досліджувався окремо.

Запитання. Є ще питання щодо моделі: прийнято лінійну пружність і малі деформації — обґрунтуйте, наскільки це коректно, і за яких умов таке припущення перестає бути справедливим?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Це припущення діє не однаково в усій моделі — і саме тому в макромоделі бетону воно свідомо поєднане з нелінійною моделлю пошкоджуваної пластичності, а не застосоване бездумно всюди. Лінійно-пружна модель є стандартним і валідованим підходом у мікромеханіці композитів, та сама логіка, що й у класичних теоріях Хашина чи рівняннях Халпіна — Цая. Для бетонної матриці — саме тому, що лінійна пружність некоректна поблизу руйнування, — використано не пружну, а модель пошкоджуваної пластичності, яка враховує розтріскування та зниження жорсткості при наближенні до $\varepsilon_{\text{lim}} = 0,0035$.

Запитання. Ще питання до 7-го слайда: які граничні умови закладалися під час моделювання скловолоконної арматури?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Насамперед було створено базу даних з усіма характеристиками волокон та матриці; до неї увійшли всі фізичні характеристики, взяті з даних виробників або зі статей з результатами досліджень. Далі було проведено багатопараметричні розрахунки репрезентативних об'ємів 9 комбінацій матеріалів, після чого їх результати вносились до модуля Steady-State Thermal, де модель куба з арматурою піддавалася нагріванню. Потім карти розподілу температури вносились до модуля Static Structural, де на куб діяло статичне навантаження.

Запитання. Уявімо, що сталася пожежа: який фізичний механізм ви вважаєте основним при втраті несучої здатності арматури — це, мабуть, деградація полімерної матриці, чи порушення адгезії на межі «волокно–матриця», чи втрата механічних властивостей, чи сукупність цього?

Відповідь здобувача Євгенія Пілюгіна. Дякую за запитання. Насправді тут діятиме сукупність цих чинників: спочатку поблизу температури склування матриця починає розм'якшуватися, і арматура втрачає закладені в неї фізичні характеристики, а потім матриця деградує, волокна перестають працювати спільно, і арматура не працює так, як мала б.

Професор Дмитро Колосов.

Я цілком задоволений Вашими відповідями.

Зауваження рецензента доц. Вікторії Козечко за результатами вивчення дисертації.

1. Робота містить значну кількість англomовних 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 енергодисперсійного 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.

Відповіді здобувача Євгенія Пілюгіна на зауваження рецензента доц. Вікторії Козечко.

1. Використані у роботі аббревіатури (GFRP, FRP, RVE, EDX та інші) є усталеними міжнародними скороченнями відповідної галузі та наводяться з розшифруванням при першому згадуванні в тексті. Побажання щодо оформлення окремого переліку умовних скорочень буде враховано у подальшій науковій роботі.

2. Електронно-мікроскопічні дослідження виконувалися за стандартних режимів зйомки, а показники збільшення зазначені безпосередньо на масштабних лінійках відповідних рисунків. Побажання щодо доповнення підписів відомостями про збільшення та режим зйомки враховуватиметься надалі.

3. Терміни «скловолоконна арматура», «композитна арматура» та «склопластикова (GFRP) арматура» вживаються в роботі як тотожні й позначають один і той самий об'єкт дослідження — полімерну арматуру, армовану скляним волокном. Різні назви застосовано відповідно до контексту викладу, а їх рівнозначність не впливає на зміст та результати роботи.

4. Із зауваженням погоджуюсь. Значну частину джерел, старших за десять років, становлять фундаментальні праці та базові міжнародні стандарти (ACI 440, CSA S806, fib Bulletin 40, ISO 10406), які зберігають чинність і є основою відповідного наукового напрямку. Крім того, кількість україномовних джерел за цією тематикою є обмеженою, що зумовило переважання іноземних публікацій.

Зауваження рецензента доц. Юлії Слупської за результатами вивчення дисертації.

1. У роботі для чисельного моделювання використано кілька програмних продуктів комплексу ANSYS (Material Designer, Workbench, Steady-State Thermal, Static Structural), проте не наведено обґрунтування вибору саме цих інструментів порівняно з іншими доступними програмними засобами скінченноелементного аналізу.

2. У другому розділі детально описано методики випробувань, однак не зазначено кількості повторних вимірювань для окремих видів досліджень, що ускладнює оцінку відтворюваності результатів.

3. Результати експериментальних випробувань на статичний стиск (таблиця 4.3) подано у вигляді середніх значень міцності; для наочності доцільно було доповнити їх графічним поданням — діаграмами «навантаження–деформація» для характерних зразків.

4. У практичних рекомендаціях запропоновано конкретну комбінацію матеріалів (AR-скло/бензоксазин) з урахуванням товщини захисного шару бетону, проте не наведено орієнтовної економічної оцінки доцільності застосування композитного армування порівняно зі сталевим.

Відповіді здобувача Євгенія Пілюгіна на зауваження рецензента доц. Юлії Слупської.

1. Вибір програмного комплексу ANSYS зумовлений тим, що це верифікований і сертифікований засіб скінченноелементного аналізу, широко апробований у світовій інженерній практиці. Модуль Material Designer містить вбудований інструментарій гомогенізації властивостей композитів методом представницького об'єму (RVE), а середовище Workbench забезпечує послідовне поєднання теплового (Steady-State Thermal) та структурного (Static Structural) аналізів у межах єдиної моделі, що є оптимальним для задач термомеханіки армованих конструкцій.

2. Дослідження виконувалися з достатньою для оцінки відтворюваності кількістю повторних вимірювань: випробування на статичний стиск проведено на трьох серіях зразків (6, 6 та 4 зразки відповідно); вимірювання мікротвердості виконувалось не менше ніж у п'яти точках кожної структурної зони з побудовою профілю вздовж діаметра шліфа; EDX-аналіз проводився у кількох точках, за лінійними профілями та методом картування розподілу елементів.

3. Результати випробувань на статичний стиск подано у вигляді значень міцності відповідно до вимог чинних стандартів; характер деформування та руйнування зразків усіх трьох серій був подібним. Побажання щодо доповнення результатів діаграмами «навантаження–деформація» буде враховано в подальшій роботі.

4. Основний економічний ефект застосування скловолоконної арматури досягається не на етапі виготовлення, а протягом життєвого циклу конструкції: завдяки корозійній стійкості усувається потреба у витратах на захист від корозії, ремонт і відновлення армування, що є визначальним для споруд в агресивних середовищах. Детальний техніко-економічний розрахунок за критерієм вартості життєвого циклу є предметом подальших досліджень.

Зауваження офіційного опонента, проф. Бориса Середи за результатами вивчення дисертації.

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 сканувальна 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'язувальними агентами, застосування термостійких смол) як перспективного напрямку подальших досліджень.

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

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 стилістичні неточності та друкарські похибки, які, втім, не впливають на зміст роботи.

Відповіді здобувача Євгенія Пілюгіна на зауваження офіційного опонента проф. Бориса Середи.

1. Обрана експоненційна форма опису зниження модуля пружності відповідає фізичній природі процесу — поступовому зниженню жорсткості полімерної матриці з наближенням до температури склування — і узгоджується із загальновідомими підходами до опису термомеханічної деградації полімерних композитів (моделі сигмоїдального типу Mahieux, Gibson). Її перевагою є мала кількість параметрів та зручність ідентифікації за експериментальними даними, що й обумовило її застосування в роботі.

2. EDX-аналіз дозволяє встановити механізм карбонізації полімерної матриці на якісному рівні — за характером і масштабом зміни елементного складу: зростання вмісту вуглецю з приблизно 26 % до 54–77 %, практичне зникнення кремнію та кальцію в зонах матриці. Такий масштаб зміни надійно свідчить про сам факт термічної деструкції сполучного, однак не дає кількісного визначення температурних інтервалів цього процесу. Доповнення результатів методами термогравіметрії та диференціальної сканувальної калориметрії дійсно дозволило б кількісно встановити ці інтервали і передбачається як напрям подальших досліджень.

3. Установлений у роботі результат — про визначальну роль руйнування матриці за збереження властивостей волокон — саме й указує на матрицю та

міжфазну границю як на об'єкт подальшого вдосконалення. Це частково відображено у висновках роботи: за критерієм термостійкості рекомендовано комбінації на основі бензоксазинової смоли з найвищою температурою склування. Обговорення шляхів підвищення термостійкості (модифікація силановими зв'язувальними агентами, застосування термостійких смол) є перспективним напрямом подальших досліджень.

4. Клас вогнестійкості R характеризує час у хвилинах збереження несучої здатності конструкції за стандартного температурного режиму пожежі. Для конструкцій зі скловолоконним армуванням граничним станом є досягнення на рівні арматури температури склування матриці, за якої втрачається зчеплення волокно–матриця; саме тому в роботі як граничний критерій запропоновано рівень $0,8 \cdot T_g$. Виконане чисельне моделювання показало, що бетонний захисний шар забезпечує затримку прогріву арматури, і за прийнятої товщини шару критична температура на рівні арматури досягається приблизно через 30 хвилин пожежного впливу, що відповідає класу R30. Отже, практичне врахування полягає у призначенні такої товщини захисного шару, яка гарантує, що температура арматури не перевищить $0,8 \cdot T_g$ матриці протягом нормованого часу відповідного класу вогнестійкості; для підвищених класів доцільним є збільшений захисний шар, нанесення додаткових термозахисних покриттів або застосування матриць з вищою температурою склування.

5. Установлена рівноцінність є очікуваним і фізично обґрунтованим результатом. При осьовому стиску кубічного зразка навантаження сприймається переважно бетоном, а центрально розташований одиничний стрижень за незначного коефіцієнта армування (близько 1,5 %) практично не впливає на несучу здатність зразка при стиску. Саме тому середні значення міцності трьох серій (40,5; 41,2 та 39,3 МПа) різняться в межах похибки. Цей результат підтверджує визначальну роль бетону при осьовому стиску; натомість принципові відмінності між сталевую та скловолоконною арматурою виявляються насамперед за роботи на розтяг та за термічного впливу, дослідженню яких і присвячено основну частину роботи.

6. Із зауваженням погоджуюсь.

Зауваження офіційного опонента, проф. Віри Вахрушевої за результатами вивчення дисертації.

1. У роботі досліджено дев'ять комбінацій армувального матеріалу (три типи скла $\times$ три типи полімерної матриці), проте не наведено достатнього обґрунтування, чому обрано саме ці склади і не розглянуто інших поширених варіантів композитного армування (зокрема базальтового волокна або поліефірних матриць).

2. Експериментальні випробування виконано на кубічних зразках із центрально розташованим стрижнем за схемою осьового стиску. Перенесення встановлених закономірностей на елементи конструкцій, які працюють на згин (балки, плити), у яких арматура сприймає переважно розтягувальні зусилля, потребує додаткового наукового обґрунтування або відповідного обмеження.

3. Стабільність міжфазної зони оцінено після 28-добової витримки композитної арматури у складі бетонних зразків. Для обґрунтованого висновку про

експлуатаційну надійність композитного армування бажаними є дані триваліших випробувань у лужному середовищі бетону.

4. Метод EDX-аналізу дає напівкількісні результати, особливо при визначенні легких елементів (вуглець, кисень). У роботі доцільно було зазначити похибку визначення концентрацій цих елементів, що підвищило б коректність кількісних оцінок.

5. Потребує уточнення, чи враховувалася анізотропія коефіцієнта теплового розширення композиту (у поздовжньому та поперечному напрямках) при оцінці критерію термомеханічної сумісності скловолоконної арматури з ізотропною бетонною матрицею.

Відповіді здобувача Євгенія Пілюгіна на зауваження офіційного опонента проф. Віри Вахрушевої.

1. Вибір саме цих складів обумовлений їх практичним застосуванням у виробництві скловолоконної арматури. Три типи скла охоплюють основний діапазон властивостей: Е-скло — найпоширеніше загального призначення, AR-скло — лугостійке, спеціально призначене для експлуатації у бетоні, S-скло — високоміцне. Три полімерні матриці (вінілестерна, епоксидна, бензоксазинова) є основними для конструкційних композитів і охоплюють широкий діапазон температур склування (від 120 до 230 °C). Поліефірні матриці свідомо не розглядалися через їх низьку лугостійкість та невисоку температуру склування, а базальтове волокно належить до окремого класу композитної арматури (BFRP), який виходить за межі теми роботи, зосередженої на скловолоконному армуванні.

2. Погоджуюсь із необхідністю обмеження області застосування отриманих результатів. Випробування на осьовий стиск не поширюються прямо на роботу арматури в елементах, що працюють на згин. Мета цих випробувань полягала в оцінці впливу типу армування на міцність бетону при стиску, і встановлено, що такий вплив є несуттєвим. Робота скловолоконної арматури на розтяг у згинаних елементах (балках, плитах) визначається її механічними характеристиками, які є нормованими, а основним предметом дисертації є структуроутворення та термічна деградація міжфазних границь волокно–матриця, а не розрахунок згинаних конструкцій, тому отримані результати слід застосовувати саме в цих межах.

3. Тривалість витримки 28 діб відповідає нормативному терміну набуття бетоном проектної міцності. EDX-аналіз арматури після витримки у складі бетонних зразків не виявив змін розподілу елементів на міжфазних границях, тобто деградації міжфазної зони за цей період не відбувається. Триваліші випробування у лужному середовищі для остаточного висновку про довговічність композитного армування передбачаються як окремий напрям подальших досліджень.

4. Метод EDX дійсно дає напівкількісні результати, а похибка визначення концентрацій легких елементів — вуглецю та кисню — є підвищеною порівняно з важкими елементами. Саме тому, як зазначено вище, елементний склад використовувався передусім для встановлення напряму та масштабу структурних

змін (факту карбонізації), а не для точного кількісного визначення концентрацій чи часо-температурних параметрів процесу — для цього, як слушно зауважено, потрібні методи термічного аналізу.

5. Анізотропія коефіцієнта теплового розширення в роботі врахована безпосередньо. Методом RVE-моделювання для кожної комбінації окремо визначено поздовжній α_1 та поперечні $\alpha_{2,3}$ коефіцієнти теплового розширення і встановлено їх принципово різну поведінку: поздовжній α_1 зі зростанням об'ємної частки волокна зменшується різко й нелінійно (тепловий відгук уздовж осі стрижня контролюють жорсткі волокна), тоді як поперечний $\alpha_{2,3}$ спадає майже лінійно (у поперечному напрямку домінує матриця). У критерії термомеханічної сумісності визначальною є поперечна складова, оскільки арматурний стрижень працює в бетоні як циліндричне включення, і цілісність контактної зони визначається саме радіальним, тобто поперечним, розузгодженням теплових деформацій арматури та ізотропного бетону; поздовжня складова зумовлює зсувні напруження вздовж стрижня і не є визначальною для розтріскування контактної зони. Оскільки поперечна складова є більшою та найбільше відрізняється від коефіцієнта теплового розширення бетону, узгодження саме за нею є найбільш раціональним критерієм сумісності.

На інші зауваження була надана відповідь під час захисту.

Результати відкритого голосування:

«За» _____ 5 _____ членів ради,
«Проти» _____ 0 _____ членів ради.

На підставі результатів відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада присуджує Пілюгину Євгенію Дмитровичу ступінь доктора філософії у галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

Голова разової спеціалізованої
вченої ради, професор,
завідуючий кафедри МБМІ



Дмитро КОЛОСОВ