

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ПОВЕДІНКУ КОМПОЗИТО-БЕТОНУ: ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Ротт Н. О., Пілюгін Є. Д.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**Анотація.** У роботі наведено результати числового моделювання термомеханічної поведінки бетонних елементів, армованих склопластиковою арматурою (GFRP), з метою визначення рівня їхньої вогнестійкості. Розрахунки здійснено в програмному комплексі ANSYS у послідовній постановці: спочатку розв'язувалася задача теплопровідності за стандартною кривою ISO 834, після чого результати використовувалися для статичного аналізу. Матеріальні властивості бетону, GFRP та інтерфейсу «FRP-бетон» враховувалися як температурно-залежні, а відмова визначалася за температурними, деформаційними й адгезійними критеріями. Отримані температурно-часові залежності й профілі через товщу бетону довели ефективність захисного шару на початкових етапах нагрівання. Зазначено, що деградація властивостей GFRP розпочинається за температури склування (~120 °C) і стає критичною в інтервалі 200–250 °C, що визначає втрату несної здатності. Доведено, що бетон зберігає залишкову міцність довше за ніж композитну арматуру.

### Вступ

Сучасні тенденції розвитку будівництва спрямовані на впровадження нових матеріалів, що забезпечують підвищену довговічність й ефективність конструкцій. Одним із таких матеріалів є композитна арматура, зокрема склопластиковою (GFRP), яка визначається високою корозійною стійкістю, малою вагою та привабливою вартістю, як порівняти зі сталлю [1–4].

Однак, крім переваг, існує й низка обмежень, що виникають насамперед через поведінку полімерної матриці композита за підвищених температур. На відміну від традиційної сталевий арматури, склопластик втрачає несну здатність під час нагрівання значно швидше, що особливо критично в умовах пожежі. Тому питання вогнестійкості бетонних елементів, армованих GFRP, набуває особливої актуальності.

Відомо, що бетон певною мірою здійснює функцію захисного бар'єра від високих температур. Водночас результати досліджень демонструють, що застосування додаткових заходів – збільшення товщини захисного шару чи використання спеціальних вогнезахисних покриттів – може істотно покращити стійкість конструкцій у пожежних умовах.

Таким чином, дослідження термомеханічної поведінки композито-бетонних елементів з GFRP-арматурою та виявлення критичних факторів втрати їхньої несної здатності є важливим завданням як з наукової, так і з практичної точки зору. Одним із найбільш ефективних інструментів для цього є числове

моделювання, що дозволяє враховувати комплекс температурно-залежних властивостей матеріалів і прогнозувати поведінку конструкцій у реальних умовах пожежі.

### Аналіз публікацій

Розвиток технологій виробництва FRP сприяв появі нових різновидів арматури – склопластикової (GFRP), базальтопластикової (BFRP), вуглепластикової (CFRP) тощо. Кожен із цих типів має свої особливості міцності, модуля пружності та вартості, що дає широкі можливості для оптимізації проектних рішень. Наприклад, GFRP використовується завдяки відносно низькій ціні та гарній корозійній стійкості, тоді як CFRP має надзвичайно високий модуль пружності й міцність, але його вартість обмежує сфери застосування. Базальтова арматура поєднує задовільні механічні властивості з доступною ціною.

У практичній діяльності FRP-арматура дедалі активно застосовується в транспортному будівництві, для зведення мостів, дорожніх і гідротехнічних споруд, у промислових і цивільних будівлях. Особливий інтерес становить використання FRP у середовищах із високою агресивністю (морська вода, хімічні виробництва), де термін експлуатації сталевий арматури значно скорочується. У таких умовах FRP забезпечує довговічність конструкцій та зменшує експлуатаційні витрати.

Упродовж останніх двадцяти років було проведено значну кількість досліджень,

спрямованих на визначення рівня вогнестійкості бетонних конструкцій, армованих композитними матеріалами. Ці роботи охоплюють як експериментальні випробування повномасштабних елементів, так і розроблення аналітичних і чисельних моделей для прогнозування їхньої поведінки під час пожежі.

Попри очевидні переваги, широке впровадження FRP стримується низкою чинників. Одним із ключових є недостатнє вивчення поведінки FRP-армованих конструкцій за високих температур, зокрема в умовах пожежі. На відміну від сталі, яка має відносно передбачувану втрату міцності та пластичність у процесі нагрівання, композитні матеріали поведуться зовсім інакше. Полімерна матриця, що зв'язує волокна, визначається низькою температурою склування, за якої відбувається різке зменшення жорсткості. Подальше нагрівання призводить до термічного розкладання матриці, втрати адгезійних властивостей і навіть горіння [1, 7, 8, 10]. Це означає, що в разі пожежі FRP-арматура може швидко втратити несну здатність і стати джерелом додаткової небезпеки через виділення диму та токсичних газів.

Крім деградації самої арматури, критично важливим є питання зчеплення FRP із бетоном. Відомо, що адгезія визначає сумісну роботу композитної арматури та бетонної матриці, а отже, загальну несну здатність елементів. Під час пожежі виникають додаткові термічні напруження через різницю в коефіцієнтах теплового розширення FRP і бетону. Це призводить до утворення мікротріщин у захисному шарі, втрати цілісності контакту й ослаблення адгезії [3, 9]. У багатьох випадках втрата зчеплення настає раніше, ніж руйнування самого FRP, що робить цю проблему однією з ключових у процесі визначення рівня вогнестійкості FRP-RC- елементів.

Пожежна безпека конструкцій із FRP-арматурою на сьогодні є серйозним викликом для проєктувальників. З одного боку, наявні будівельні норми (наприклад EN 1992-1-2) розроблені переважно для традиційних RC-конструкцій зі сталлю, тому не враховують специфічних властивостей FRP. З іншого боку, кількість експериментальних даних про поведінку FRP за високих температур є обмеженою, а проведення повномасштабних пожежних випробувань є надзвичайно високовартісним і трудомістким процесом [3].

Останні дослідження [3–5, 9–12] свідчать про те, що період вогнестійкості FRP-RC-

елементів зазвичай нижчий за період вогнестійкості традиційних сталезалізобетонних конструкцій. Визначено, що додаткові заходи, зокрема збільшення товщини бетонного покриття або застосування спеціальних протипожежних засобів, значно покращують термостійкість елементів. Проте навіть у таких випадках актуальною є проблема втрати зчеплення FRP-бетон, що знижує ефективність конструкції та може призвести до раптового руйнування.

Узагальнений аналіз свідчить про декілька важливих тенденцій: по-перше, більшість експериментальних даних підтверджують, що FRP-RC-елементи демонструють нижчу вогнестійкість, як порівняти з традиційними сталезалізобетонними конструкціями. Причиною цього є термочутливість полімерної матриці, яка починає втрачати жорсткість за температур 120 °C, а в разі подальшого нагрівання зазнає структурної деструкції. Унаслідок цього волокна перестають ефективно працювати в композиті, що призводить до швидкої втрати міцності; по-друге, низка досліджень акцентує увагу на проблемі зчеплення між FRP і бетоном. Відомо, що адгезійний шар є найвразливішим місцем у конструкції. У низці експериментів було зафіксовано передчасне відшаровування FRP-листів або вивільнення стрижнів через втрату анкерування. Це свідчить про те, що прогнозування вогнестійкості без урахування деградації зчеплення є неповним і потенційно небезпечним; по-третє, наукова спільнота поступово переходить від чисто експериментального підходу до чисельного моделювання, яке дозволяє заощадити ресурси та отримати ширший спектр даних. Водночас моделі потребують валідації на основі реальних випробувань, адже їхня точність значною мірою залежить від правильності опису фізичних процесів.

### Експериментальні дослідження

Важливий внесок у вивчення поведінки FRP-RC-елементів у пожежних умовах зробили роботи Bisby, Kodur, Williams, Gao та їхніх колег [3, 5, 10]. Вони провели низку стандартних вогневих випробувань балок і колон, армованих композитами, зокрема GFRP та CFRP.

У роботі [3] зазначено, що за відсутності вогнезахисного шару FRP-армовані елементи втрачають несну здатність значно швидше за аналоги зі сталлю. Водночас застосування мінераловатних плит або цементно-

вогнетривких покриттів суттєво збільшує час до руйнування. Аналогічні результати були отримані в роботі [13], де наведено дослідження Т-подібних балок із зовнішнім укріпленням FRP.

Автори роботи [10] звернули увагу на тип руйнування: для FRP-RC-елементів він був крихким і раптовим, без видимих пластичних деформацій. Це створює додаткові ризики для безпеки, адже відсутні характерні «сигнали» втрати несної здатності, притаманні сталевим конструкціям.

Додаткові дослідження [14] і [15] підтвердили, що температура склування  $T_g$  полімерної матриці є ключовим параметром для визначення міцності під час нагрівання. Після досягнення  $T_g$  швидкість деградації властивостей FRP різко зростає. Визначено також, що міцність на розтягування листів FRP знижується швидше за міцність стрижнів через технологію виготовлення та структурою матеріалу.

Таким чином, експериментальна основа довела сам факт низької вогнестійкості FRP, проте вона не має достатньої кількості інформації для створення універсальних розрахункових методик.

#### Аналітичні та чисельні моделі

З огляду на високу вартість випробувань, активно розвивається напрям чисельного моделювання.

Одним із перших підходів була секційна модель [3], яка описувала поведінку FRP-колон під час пожежі. Проте вона не враховувала деградацію зчеплення, що знижувало точність результатів.

Подальші процеси були здійснені в роботі [16], де застосували нелінійну модель скінченних елементів для аналізу Т-подібних балок. Вони врахували теплопередачу та деформації, проте вважали, що FRP та бетон залишаються повністю зчепленими, навіть за високих температур. Це не відображало реальних механізмів руйнування.

Суттєвим проривом стала робота [5], в якій автори розробили модель в ABAQUS, яка містила вплив навантаження, теплового розширення, деградації матеріалів і зниження зчеплення FRP-бетон. Порівняння з експериментами довело адекватність моделі. Автори дійшли висновку, що зчеплення є критичним фактором, який визначає реальний час вогнестійкості.

У дослідженнях [4] розглянуто тривимірну FE-модель для згинальних FRP-RC-

елементів, яка враховувала деградацію адгезії. Автори визначили, що моделі, які ігнорують цей аспект, суттєво завищують вогнестійкість. Запропонована методика була валідована на основі повномасштабних випробувань, продемонструвавши високу точність.

Таким чином, процес розвиток чисельних моделей пройшов шлях від спрощених схем до комплексних 3D-рішень. Однак уніфікованих моделей, придатних для широкого спектра конструкцій і типів FRP, на сьогодні не існує. Саме це й зумовлює потребу у подальших дослідженнях, спрямованих на розроблення більш достовірних й універсальних моделей, що дозволять забезпечити надійність і безпеку споруд у випадку пожежі.

#### Мета дослідження

Метою роботи є комплексне дослідження поведінки згинальних бетонних елементів, армованих композитною арматурою, в умовах пожежного впливу. Особлива увага приділяється врахуванню процесів деградації механічних характеристик як бетону, так і FRP, а також змінам у роботі інтерфейсу «арматура-бетон», що визначає сумісність і довговічність конструкції. На відміну від більшості попередніх досліджень, де ефект втрати зчеплення ігнорується або подається надто спрощено, у нашій роботі робиться спроба інтегрувати цей аспект у чисельну модель для підвищення достовірності прогнозів.

Досягнення поставленої мети дозволяє розширити наявні уявлення про термомеханічну поведінку FRP-RC-конструкцій і створює передумови для формування більш обґрунтованих методик їх проектування. Це має не лише теоретичне значення для розвитку будівельної науки, але й практичну цінність, оскільки забезпечує інженерів більш надійним інструментом для аналізу вогнестійкості споруд. У перспективі результати дослідження можуть стати основою для адаптації чинних нормативних документів, які нині зорієнтовані переважно на конструкції зі сталевую арматурою і не відображають специфічних властивостей композитів.

Таким чином, головна мета роботи полягає у створенні та апробації вдосконаленої чисельної моделі, яка дозволить точно прогнозувати втрату несної здатності FRP-RC-елементів під час пожежі. Реалізація цієї мети забезпечує можливість не лише наукового аналізу, але й практичного застосування отриманих результатів у сфері безпеки та

довговічності сучасних будівельних конструкцій.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

#### Загальні підходи до чисельного моделювання

Аналіз поведінки бетонних елементів з FRP-арматурою в умовах пожежі є складним завданням, яке вимагає врахування великої кількості фізичних процесів: теплопередачі, термічного розширення, деградації матеріалів та зчеплення між ними. Для цього найчастіше застосовують метод скінченних елементів (FEA), який дає можливість комплексно дослідити взаємодію теплових і механічних факторів. У більшості досліджень аналіз проводиться в два етапи.

Перший етап полягає у розв'язанні задачі теплопровідності для визначення розподілу температур у поперечному перерізі конструкції. Для цього використовується нестационарне рівняння теплопровідності з урахуванням конвективного та радіаційного теплообміну на поверхні бетону. Граничні умови задаються відповідно до стандартних температурних кривих (ISO 834 або EN 1991-1-2 [17]), які апроксимують розвиток пожежі в реальних умовах. На цьому етапі ключовими є теплові характеристики матеріалів – теплопровідність, теплоємність і густина, які суттєво змінюються з температурою.

Другий етап передбачає механічний аналіз, у якому температурний розподіл використовується як вхідні дані. Тут необхідно враховувати нелінійну поведінку бетону, сталі (якщо вона наявна в елементі) та FRP у процесі нагрівання. Для бетону зазвичай застосовують модель пошкодженої пластичності (Concrete Damaged Plasticity, CDP) [7–8], яка враховує як стискальні, так і розтягувальні властивості з урахуванням появи тріщин. Для FRP використовуються емпіричні залежності модуля пружності та міцності від температури, отримані з експериментальних даних [6, 9, 14, 15].

Велике значення має опис інтерфейсу «FRP-бетон». У більшості сучасних моделей застосовується підхід напруження – ковзання, який дозволяє відтворити втрату зчеплення залежно від величини деформацій і температури [9]. Саме ця частина моделі є критичною для адекватного прогнозування вогнестійкості, оскільки численні дослідження довели, що руйнування інтерфейсу часто відбувається раніше за руйнування самих матеріалів.

**Теплові властивості матеріалів.** Бетон, як і в більшості конструкцій, є основним вогнезахисним бар'єром для арматури завдяки своїй відносно низькій теплопровідності. За кімнатної температури коефіцієнт теплопровідності важкого бетону становить 2,0–2,5 Вт/м·К, однак зі збільшенням температури він зменшується до 0,5–0,7 Вт/м·К за 1000 °С [2]. Питома теплоємність бетону в цьому випадку збільшується до 900–1000 Дж/кг·К. Крім того, процес дегідратації цементної матриці, що відбувається приблизно за 100–200 °С, знижує його міцність і сприяє утворенню тріщин. Це означає, що бетон, хоча й уповільнює прогрівання арматури, але одночасно втрачає частину власних несних властивостей.

Щодо композитної арматури, у цьому дослідженні використовується склопластик (GFRP), де як матриця застосовується вінілестерна смола. На відміну від більш поширених епоксидних систем, вінілестерні смоли визначаються нижчою температурною стійкістю. Середня температура склування вінілестерної смоли дорівнює 120 °С, що визначає межу початку втрати жорсткості композита, тоді як в епоксидних смолах цей показник становить 120–180 °С. Це означає, що в процесі нагрівання вже до 120 °С композит починає втрачати жорсткість, а модуль пружності арматури знижується.

Подальше нагрівання призводить до процесів піролізу вінілестерної смоли, які інтенсивно розвиваються в діапазоні 200–250 °С. У цей момент відбуваються процеси значної втрати маси, виділення летких продуктів і зменшення адгезійних властивостей матриці. За температур більше ніж 300 °С смола майже втрачає несну здатність, а за 350–400 °С можливе займання залишкових органічних компонентів.

Волокна скловолокна є відносно термостійкими (до 600–700 °С), однак вони ефективно працюють лише за умови наявності міцної зв'язки з матрицею. У випадку вінілестерної смоли така зв'язка руйнується на ранніх стадіях нагрівання, що й обумовлює різке падіння механічних характеристик композитної арматури. Тобто саме матриця є «слабкою ланкою» в термічних процесах GFRP.

Таким чином, для коректного моделювання процесів GFRP-арматури необхідно використовувати залежності теплофізичних характеристик саме для вінілестерних систем. Зниження модуля пружності та міцності має враховуватися вже зі 120 °С, а критичними

точками є 200–250 °C (піроліз) та 300–350 °C (майже повна втрата властивостей матриці). Це означає, що навіть за відносно низьких температур пожежі (150–200 °C) композитна арматура може втратити значну частину ефективності, що варто зазначити в чисельній моделі.

**Механічні властивості матеріалів за високих температур.** У механічному аспекті бетон втрачає свою міцність на стискання вже за 300–400 °C, а за 800–1000 °C його залишкова міцність становить не більше 20 – 30 % від початкової [2]. Водночас бетон є крихким матеріалом, тому важливим є правильне визначення тріщиноутворення й поширення пошкоджень. Для цього у чисельних моделях використовується концепція пошкодженої пластичності, яка поєднує пружнопластичну поведінку зі зниженням жорсткості через утворення тріщин [7, 8].

Для FRP-арматури ключовим є аналіз залежності міцності на розтягування й модуля пружності від температури. На основі експериментальних досліджень [6, 9, 14, 15] визначено, що вже за 200–250 °C міцність GFRP може знижуватися на 50 %, а за 400 °C матеріал майже втрачає несну здатність. CFRP демонструє дещо вищу термостійкість завдяки вуглецевим волокнам, проте полімерна матриця все одно залишається слабкою ланкою.

Особливої уваги заслуговує зчеплення FRP-бетон. Під час експериментів у роботі [9] було визначено, що міцність зчеплення різко зменшується після досягнення  $T_g$ . Навіть якщо самі волокна зберігають міцність, конструкція може втратити несну здатність через відрив арматури від бетону. Саме тому моделювання інтерфейсу є одним із найважливіших завдань у дослідженнях вогнестійкості.

#### **Особливості визначення завдання в дослідженні**

У нашому дослідженні було використано послідовний підхід до термомеханічного аналізу. Спочатку була розв'язана задача теплопровідності з урахуванням стандартної температурної кривої ISO 834. На цьому етапі враховувалась вологовмісткість бетону, оскільки випаровування води здійснює основну функцію в тепловому балансі.

На наступному етапі було отримано температурні поля для механічного аналізу. Основою моделі бетону є CDP, яка дозволяє проаналізувати процес накопичення пошко-

джень і втрату міцності. Для FRP були використані емпіричні залежності, що нормалізовані відповідно до температури  $T_g$ , як пропонували в роботі [3]. Інтерфейс «FRP-бетон» було змодельовано за допомогою температурно-залежної моделі напруження – ковзання, що враховує зниження адгезії під час нагрівання.

Такий підхід дозволив отримати не лише загальний час вогнестійкості елементів, але й проаналізувати тип руйнування, його причини (деградація FRP, втрата міцності бетону чи відрив арматури від матриці). Це також створює основу для більш детального розуміння механізмів роботи FRP-RC-конструкцій у пожежних умовах.

**Геометрія, граничні умови та навантаження.** У числовому моделюванні було розглянуто зразки кубічної форми розміром 100×100×100 мм. Усередині кубів розташовувалася арматура діаметром 12 мм, занурена в бетон із захисним шаром товщиною 44 мм. Як армування була використана склопластикові арматура типу GFRP (MST-BAR Grade III), матрицею якої є вінілестерна смола.

Геометрія моделі формувалася в середовищі ANSYS Workbench. Бетонна частина задавалася як паралелепіпед із суцільною структурою, армування моделювалося окремим циліндричним тілом, інтегрованим у бетон. Для забезпечення коректної роботи контактної взаємодії між матеріалами передбачалося спільне використання вузлів bonded.

Нижня грань куба фіксувалася як жорстка опора (Fixed Support). На верхню грань прикладалося механічне навантаження у вигляді рівномірно розподіленого тиску, що дорівнює силі стискання зразка. Значення навантаження вибирали так, щоб забезпечити співставлення із результатами експериментальних випробувань на стискання.

Термічні умови моделювали стандартний пожежний вплив за ISO 834. Нагріта грань куба (одна з бічних поверхонь) піддавалася дії кривої, тоді як інші поверхні мали умови конвективного теплообміну з навколишнім середовищем. У товщі бетону для контролю температури в різних точках були задані контрольні вузли, зокрема на поверхні та на рівні арматури.

Моделювання здійснювалося в послідовному режимі: спочатку розв'язувалася задача теплопровідності з визначенням розподілу температури в тілі зразка в часі, після чого отримані температурні поля застосовувалися

в модулі статичного розрахунку для аналізу напружено-деформованого стану.

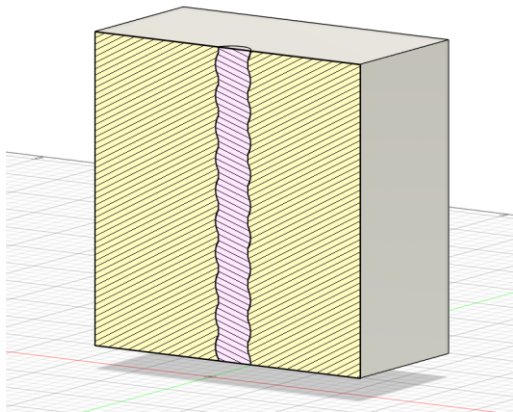


Рис. 1. Початкова 3D-модель для розрахунків

Для контролю результатів у модель були введені контрольні точки (probes). Зокрема вимірювалася температура:

- на нагрітій поверхні бетону;
- у зоні арматури (на рівні захисного шару);
- у середині куба (нейтральна точка).

**Матеріальні моделі.** Для проведення числового аналізу було використано набір матеріальних моделей, що враховують особливості поведінки бетону, склопластикової арматури (GFRP), сталеві арматури (для порівняння), а також інтерфейсу між арматурою та бетонною матрицею.

Бетон моделювався як ізотропний матеріал зі щільністю  $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$  та коефіцієнтом Пуассона  $\nu = 0,2$ . Початковий модуль пружності дорівнював  $E_{20} = 30 \text{ ГПа}$ . Температурна залежність пружних характеристик задавалась згідно з рекомендаціями [2]: за  $200^\circ\text{C}$  модуль знижувався до  $0,8 E_{20}$ , за  $400^\circ\text{C}$  – до  $0,5 E_{20}$ , за  $600^\circ\text{C}$  – до  $0,3 E_{20}$ . Теплофізичні властивості враховувалися як залежність теплоємності та теплопровідності від температури. Для відображення нелінійної поведінки бетону в процесі стискання застосовано модель багатолінійного ізотропного зміцнення (Multilinear Isotropic Hardening), у якій побудовані діаграми «напруження – деформація» з урахуванням поступової втрати міцності. Критичний рівень пластичної деформації для стискання становив  $\varepsilon_{c,lim} = 0,0035$ , що дорівнює межі руйнування бетону згідно з [11].

**Склопластикові арматура.** Арматура типу GFRP моделювалася як ортотропний матеріал. Для головної осі (вздовж волокон)

прийнято модуль пружності  $E_1 = 70 \text{ ГПа}$ , для поперечних напрямків  $E_2 = E_3 = 15 \text{ ГПа}$ . Зсувні модулі приймалися  $G_{12} = G_{13} = 5 \text{ ГПа}$ ,  $G_{23} = 3 \text{ ГПа}$ . Щільність матеріалу становила  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$ . Особливу увагу приділено температурній деградації властивостей: за досягнення температури склування вінілестерної смоли  $T_g = 120^\circ\text{C}$  модуль пружності починає різко знижуватися; за  $200^\circ\text{C}$  зберігається приблизно 30–40 % початкової жорсткості, а за  $300^\circ\text{C}$  матеріал майже втрачає несну здатність.

Міцність на розтягування в холодному стані становила  $\sigma_t \approx 1000 \text{ МПа}$ , однак вона стрімко зменшується після перевищення  $T_g$ .

Для аналізу деградації властивостей були використані емпіричні залежності, наведені в роботах [3] та підтверджені даними сертифікації CSA S807 [12] для арматури MST-BAR.

**Інтерфейс «FRP-бетон».** Зчеплення арматури з бетоном мало істотне значення для точності результатів. У розрахунках застосовано контактний підхід. Для базового сценарію було використано модель *bonded contact* (ідеальне зчеплення).

Таким чином, застосовані матеріальні моделі враховують ключові механізми деградації бетонних та армувальних матеріалів у пожежних умовах і забезпечують можливість аналізу як загальної вогнестійкості, так і механізмів відмови досліджуваних зразків.

**Результати числового аналізу.** Розрахунки теплопровідності дозволили визначити зміну температури як на поверхні зразка, так і в глибині бетону на рівні розташування арматури.

На рис. 2 наведено порівняння температурно-часових кривих для цих двох точок. Нагріта поверхня швидко досягає значень, що відповідають стандартній кривій ISO 834, тоді як температура на рівні арматури зростає значно повільніше. Часове відставання досягнення критичних температур у зоні арматури складає приблизно 15–20 хв. Приблизно на 20-й хвилині пожежного нагрівання температура в зоні арматури перевищує  $T_g \approx 120^\circ\text{C}$ , що супроводжується початком зниження жорсткості композита. Подальше зростання температури до  $200\text{--}250^\circ\text{C}$  ( $\approx 25\text{--}30$  хв нагрівання) відповідає інтенсивній деградації властивостей FRP і втраті орієнтовно 60 % початкової міцності.

На рис. 3 наведено профілі розподілу температури крізь товщу зразка від поверхні контакту арматури з бетоном у моменти часу

30, 60 та 90 хвилин та градієнти температур в ці самі проміжки часу на рис. 4. В усіх випадках спостерігається характерний градієнт температури: найбільші значення на нагрітій поверхні та поступове зменшення в напрямку до центру.

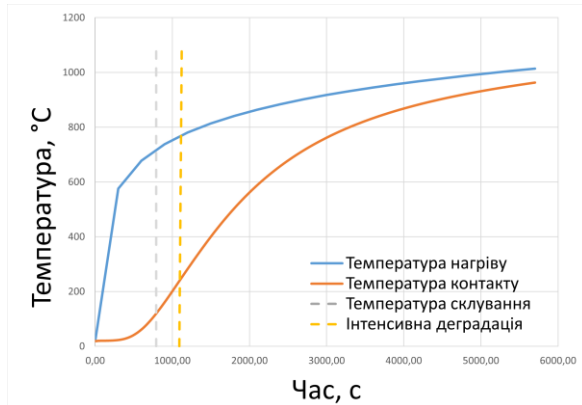


Рис. 2. Зростання температури на нагрітій поверхні та на рівні арматури

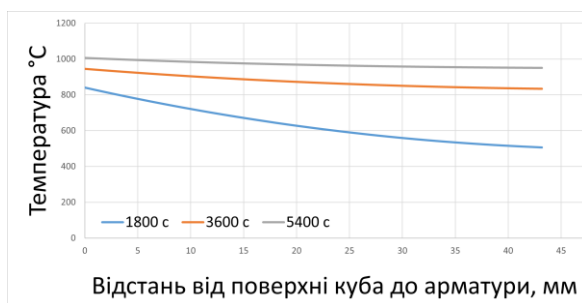


Рис. 3. Розподіл температури крізь товщу зразка в моменти часу

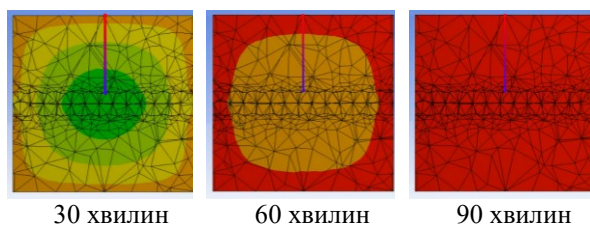


Рис. 4. Температурні градієнти, розподілу температури

**Деформаційний аналіз.** У модулі статичного розрахунку отримано залежність прогину в контрольній точці від часу нагрівання (рис. 5).

За сталого механічного навантаження прогин поступово збільшувався зі зростанням температури. Зростання прогину стає помітним уже після 20 хв, а різке збільшення фіксується після 25–27 хв, що співпадає з досягненням критичних температур у зоні арматури.

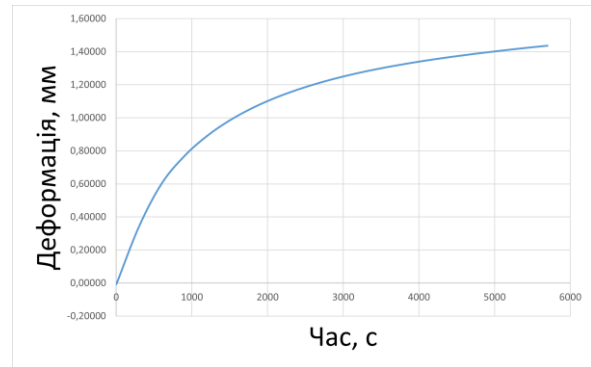


Рис. 5. Графік деформацій

**Аналіз пошкоджень.** Для аналізу розвитку пошкоджень у бетоні було проаналізовано залежності еквівалентних пластичних деформацій у часі (рис. 6). На графіку наведено мінімальні, середні та максимальні значення деформацій, отримані для всієї моделі.

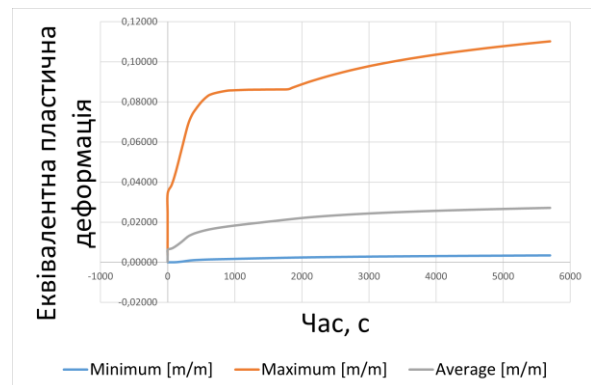


Рис. 6. Залежності мінімальних, середніх та максимальних значень еквівалентної пластичної деформації у часі

Максимальні значення демонструють різкий стрибок у перші секунди розрахунку, перевищуючи критичний рівень  $\epsilon_{s,lim} = 0,0035$  майже миттєво. Така поведінка пояснюється наявністю локальних концентрацій напружень у вузлах сітки й не може безпосередньо інтерпретуватися як реальне руйнування бетону. Саме тому для аналізу було використано середні значення, які зростають більш поступово й відображають глобальний стан матеріалу.

Середнє значення досягло рівня  $\epsilon_{s,lim} = 0,0035$  вже на  $t \approx 0,7$  с після початку нагрівання. Очевидно, це значення також є заниженим з огляду на спрощену модель бетону (Multilinear Isotropic Hardening без явного розм'якшення та мікротріщиноутворення). Таким чином, критерій за пластичною деформацією в цьому випадку доцільно інтерпретувати не як фактичний момент відмови, а як початок накопичення пошкоджень у матеріа-

лі. За фізичною шкалою часу це дорівнює приблизно 30 хв нагріву, коли середня температура в бетоні становить 250–300 °С.

Надалі реалістичніший прогноз втрати працездатності отримано за температурним та прогинним критеріями. Вони відображають поступову деградацію композитної арматури й бетону та краще узгоджуються з даними літератури.

Обговорення результатів. Отримані результати підтверджують основну функцію температурної деградації склопластикової арматури у втраті несної здатності конструкцій, армованих FRP. Уже за досягнення температури в зоні арматури на рівні 120 °С спостерігається помітне зростання прогину, що відповідає переходу вінілестерної смоли у високоеластичний стан [3]. Подальше нагрівання до 200–250 °С призводить до стрімкого зниження жорсткості й міцності FRP, що добре узгоджується з експериментальними дослідженнями [9] та результатами, наведеними в [9]. Таким чином, ключові етапи деградації відбуваються послідовно: 20 хв – початок зниження жорсткості ( $T_g \approx 120$  °С), 25–30 хв – втрата несної здатності FRP, приблизно 30 хв – помітне збільшення прогину та деформацій бетону.

Аналіз еквівалентних пластичних деформацій у бетоні (рис. 4) довів раннє перевищення порогового значення  $\epsilon_{s,lim} = 0,0035$  локально в окремих вузлах, що пояснюється обмеженнями використаної моделі. Натомість середні значення деформацій збільшувалися поступово, досягаючи критичного рівня за значно вищих температур. Це підтверджує, що деградація бетону є більш інерційним процесом і не є первинним механізмом відмови в умовах пожежі. Подібні висновки наведені і в роботі [10], де зазначається, що руйнування FRP-RC-елементів контролюється саме втратою міцності арматури.

Застосування комбінованих критеріїв відмови дозволило більш чітко визначити межу вогнестійкості:

- температурний критерій ( $T_{rebar} \geq 250^\circ$ ) є визначальним для початку втрати несної здатності;
- деформаційний критерій підтвердив збільшення прогину після перевищення  $T_g$  і його різке збільшення в інтервалі 200–250 °С;
- критерій за пластичною деформацією бетону визначав розвиток пошкоджень у матеріалі, а не фактичний момент відмови.

#### Висновки і перспективи подальших досліджень

У роботі проведено числове моделювання поведінки бетонних зразків, армованих скло-

пластиковою арматурою (GFRP), в умовах пожежного впливу. Було застосовано послідовний термомеханічний підхід, що складався з визначення температурних полів відповідно до стандартної кривої ISO 834 та подальшого статичного аналізу із використанням температурно-залежних характеристик матеріалів.

Отримані результати показали, що розподіл температури в бетоні забезпечує тимчасовий захист арматури, однак ефективність захисного шару є обмеженою. Протягом перших 15–20 хвилин нагрівання температура на рівні арматури залишається нижчою за критичну, але вже після 20 хв перевищує 120 °С.

Подальший аналіз підтвердив, що деградація властивостей GFRP розпочинається саме з моменту досягнення температури  $T_g$  (приблизно 120 °С) і стає критичною за 200–250 °С, що й визначає момент втрати несної здатності. Саме тоді, як бетон зберігає залишкову міцність на більш пізніх етапах нагрівання, склопластикові арматури є найбільш уразливим елементом конструкції. Таким чином, саме температурна деградація FRP визначає момент відмови, тоді як критерії, пов'язані з пластичною деформацією бетону чи прогином, відображають процес накопичення пошкоджень та поступову втрату жорсткості.

Практичне значення результатів полягає в підтвердженні необхідності збільшення товщини захисного шару бетону, застосування арматури з матрицями з вищою температурою склування (наприклад епоксидних), а також використання додаткових протипожежних покриттів для забезпечення підвищеної вогнестійкості конструкцій.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення матеріальної моделі бетону через використання Concrete Damage Plasticity, що дозволить більш точно враховувати постпікову поведінку та процеси розтріскування. Перспективним напрямом також є створення більш детальних моделей інтерфейсу FRP-бетон, зокрема із застосуванням підходу cohesive zone та температурно-залежних параметрів зчеплення. Важливим завданням є проведення експериментальних випробувань для верифікації числових результатів і розширення бази даних щодо поведінки FRP-RC-конструкцій у пожежних умовах. Крім того, доцільним є порівняння різних типів композитної арматури – склопластикової, базальтової та вуглецевої – з огляду на їхню термічну стабільність, що

створить основу для розроблення практичних рекомендацій і нормативного забезпечення проєктування залізобетонних елементів із використанням FRP у зонах підвищених вимог до вогнестійкості.

#### Література

1. ACI Committee 440. *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*. ACI 440.1R-06.
2. EN 1992-1-2. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design*. 2004.
3. Bisby, L., Green, M., Kodur, V. Fire endurance of FRP-confined concrete columns. *Cement and Concrete Composites*. 2005.
4. Fire Performance of FRP-RC Flexural Members: A Numerical Study / D. Duan et al. *Polymers*. 2022. 14. 346.
5. Dai J. G., Gao W. Y., Teng J. G. Finite element modeling of insulated FRP-strengthened RC beams exposed to fire. *Proc. CICE 2010*. Beijing, China.
6. Griffis C., Shen C., Dutta P. Thermal properties of FRP composites at elevated temperatures. *Journal of Composite Materials*. 1981.
7. Lee J., Fenves G. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*. 1998.
8. A plastic-damage model for concrete / J. Lubliner et al. *International Journal of Solids and Structures*. 1989.
9. Aslani F. Bond behavior of GFRP rebars in concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2010.
10. Kodur V., Bisby L. Evaluation of fire endurance of concrete beams strengthened with FRP sheets. *Journal of Structural Engineering*. 2005.
11. Fédération Internationale du Béton (fib). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn, 2013.
12. CSA S807-10. *Specification for fibre-reinforced polymers*. Canadian Standards Association, Mississauga, ON, 2010.
13. Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs / B. Williams et al. *Journal of Composites for Construction*. 2008. 12(5). 535–544.
14. Gao W. Y., Dai J. G., Teng J. G. Finite element modeling of FRP-strengthened RC beams exposed to fire. *Journal of Composites for Construction*. 2010. 14(6). 692–705.
15. Mechanical and thermal properties of FRP composites at elevated temperatures / E. Chowdhury et al. *Journal of Composites for Construction*. 2008. 12(5). 541–552.
16. Haville J. Nonlinear finite element analysis of FRP-strengthened T-beams exposed to fire. *Engineering Structures*, 2009. 31(12). 3000–3012.
17. EN 1991-1-2. *Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire*. CEN. Brussels. 2002.

**Ротт Наталія Олександрівна**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доц. каф. конструювання, технічної естетики і дизайну, rott.n.o@nmu.one, тел. +38 098-890-24-67,  
**Пілюгін Євгеній Дмитрович**<sup>1</sup>, аспірант каф. конструювання, технічної естетики і дизайну, piliuhyn.y.d@nmu.one, тел. +38 095-186-92-00,  
<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

#### Effect of temperature on the behavior of composite concrete: numerical modeling

**Aim:** The purpose of this study is to evaluate the fire resistance of concrete elements reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars through numerical modeling of thermo-mechanical behavior and to identify the critical factors that govern the loss of load-bearing capacity under fire conditions. **Methods:** The research was carried out using the ANSYS software package in a sequential approach: first, a heat transfer analysis was performed according to the ISO 834 fire curve, and then the results were applied in a static structural analysis. Temperature-dependent material properties of concrete, GFRP, and the FRP–concrete interface were defined, while failure was assessed based on multiple criteria (thermal, deformation, and bond-related). **Results:** Time–temperature curves and through-thickness profiles were obtained, demonstrating the effectiveness of the concrete cover during the early stages of heating. It was found that the degradation of GFRP properties begins at the glass transition temperature (~120 °C) and becomes critical in the 200–250 °C range, which governs the failure of the element. Analysis of equivalent plastic strains confirmed that concrete retains its residual strength longer than the reinforcement. **Scientific novelty:** A comprehensive numerical approach to assessing the fire resistance of FRP-RC elements is proposed, combining the concrete damage plasticity model with temperature-dependent characteristics of GFRP and the bond interface. It is shown that degradation of the polymer matrix in the reinforcement, rather than the concrete itself, is the primary factor leading to structural failure. **Practical significance:** The results provide a basis for recommendations on the design and fire protection of FRP-RC elements, particularly by increasing the thickness of the concrete cover, applying matrices with higher glass transition temperatures, and using additional fire protection coatings. **Keywords:** FRP reinforcement, GFRP, fire resistance, composite materials, concrete, thermo-mechanical analysis, numerical modeling, ANSYS, material degradation.

**Rott Nataliia**<sup>1</sup>, Ph.D, Assoc. Prof. Engineering and Generative Design Department, ORCID: 0000-0002-3839-6405, rott.n.o@nmu.one,  
**Piliuhin Yevhenii**<sup>1</sup>, PhD student, assistant, Engineering and Generative Design Department ORCID: 0000-0002-3639-0085, piliuhyn.y.d@nmu.one  
 ORCID: 0000-0002-3639-0085,  
<sup>1</sup>Dnipro University of Technology.

