

УДК 624.012.45:539.3:004.94

О. В. Андрійчук

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6275-097X>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Д. Ю. Громов

Аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7862-6662>

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Моделювання роботи сталевібробетонних конструкцій методом скінченних елементів

Цитувати як:

Андрійчук, О. В., Громов Д. Ю. (2025). Моделювання роботи сталевібробетонних конструкцій методом скінченних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 5-18. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-01)

© 2025, Андрійчук, О. В., Громов Д. Ю.

Анотація. У статті розглянуто особливості чисельного моделювання сталевібробетонних конструктивних елементів із використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Актуальність дослідження зумовлена потребою в комп'ютерному моделюванні та прогнозуванні напружено-деформованого стану конструкцій із композитних матеріалів, що є необхідним при проєктуванні будівель і споруд. Проведено аналіз підходів до врахування сталевої фібри у чисельному моделюванні, зокрема розглянуто дискретний підхід, за якого фібра моделюється окремими елементами, та гомогенізований, що ґрунтується на усередненні механічних властивостей матеріалу відповідно до складу. Наведено приклади реалізації цих підходів у програмних середовищах ABAQUS, ANSYS і LIRA-FEM. Коректне визначення вихідних параметрів і умов навантаження суттєво впливає на достовірність результатів чисельного моделювання.

Окрему увагу приділено моделюванню нелінійної поведінки матеріалу, зокрема граничних деформацій, процесів утворення та розвитку тріщин, а також прогнозуванню зон локалізації пошкоджень. Проаналізовано результати чисельного моделювання, які узгоджуються з даними експериментальних (стендових) випробувань, зокрема щодо характеру руйнування, залишкової міцності та енергопоглинальної здатності конструкції зі сталевою фіброю.

З'ясовано, що сталевібробетон характеризується підвищеною тріщиностійкістю, змінює механізм руйнування з крихкого на пластичний і забезпечує збереження несучої здатності після утворення тріщин. Показано, що метод скінченних елементів є ефективним інструментом для кількісної оцінки механічних характеристик сталевібробетонних елементів, зокрема в умовах комбінованого навантаження. Зроблено висновок про доцільність використання МСЕ-моделювання в інженерній практиці для обґрунтування конструктивних рішень за умов використання дисперсного армування в бетонних конструкціях.

Ключові слова: сталеві фібробетон, метод скінченних елементів, чисельне моделювання, тріщиностійкість, композитні матеріали, нелінійна поведінка, розрахунок конструкції.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного науково-технічного прогресу, що супроводжується широким впровадженням автоматизованих і цифрових технологій у виробничі процеси, особливої актуальності набуває комплексний підхід до дослідження будівельних конструкцій. Такий підхід передбачає поєднання експериментальних (стендових) випробувань із комп'ютерним моделюванням. Застосування спеціалізованих програмних комплексів підвищує точність аналізу напружено-деформованого стану та оптимізує розрахункові процедури. Одним із найпоширеніших та ефективних інструментів чисельного аналізу конструкцій є метод скінченних елементів (МСЕ), який забезпечує можливість вирішення як лінійних, так і нелінійних задач у різних технічних галузях [1-3].

У науковій літературі активно висвітлюються підходи до чисельного моделювання сталеві фібробетонних (СФБ) конструкцій. У працях [4-6] представлено загальні принципи реалізації методу скінченних елементів у програмних середовищах LIRA-FEM та ABAQUS, із акцентом на побудову скінченно-елементної сітки, задання граничних умов, візуалізацію результатів і моделювання окремих конструктивних елементів. Дослідження [7] зосереджено на аналізі впливу різномодульної структури композиту на напружено-деформований стан елементів. Натомість у роботі [8] запропоновано модель, яка окремо враховує роботу бетонної матриці, арматури та сталеві фібри, що дозволяє змодельовувати деформування СФБ. Результати науковців [9] свідчать про те, що додавання сталеві фібри підвищує пружність, енергопоглинання та змінює характер руйнування СФБ-балок. Чисельні дані, отримані в ABAQUS, узгоджуються з експериментальними результатами, що підтверджує достовірність моделі. У роботі [10] реалізовано метод глобальної дисперсії для аналізу чутливості до механічних параметрів СФБ-балок. Це дозволило визначити ключові фактори, що впливають на точність чисельного прогнозування їхньої поведінки. Особливу увагу приділено моделюванню тріщиноутворення. У [11] порівняння чисельних та експериментальних результатів засвідчує ефективність уточнення сітки для точного відтворення траєкторії розвитку тріщин.

Попри велику кількість досліджень, присвячених моделюванню сталеві фібробетонних конструкцій, у науковій літературі спостерігається фрагментарність підходів до врахування дисперсного армування. Немає єдиного підходу до вибору типу моделі (дискретної чи гомогенізованої), способу врахування післяпікової поведінки матеріалу та формування

граничних умов у чисельному аналізі. Це ускладнює порівняння результатів і знижує надійність прогнозування механічної поведінки СФБ-елементів. У зв'язку з цим виникає необхідність систематизації існуючих підходів до МСЕ-моделювання з метою узагальнення досвіду та виявлення найбільш ефективних рішень для подальшого їх застосування в інженерній практиці.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є системний аналіз та узагальнення сучасних наукових підходів до моделювання роботи сталевібробетонних конструкцій із використанням методу скінченних елементів.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- 1) класифікувати існуючі підходи до чисельного врахування сталевібробетону (дискретного та гомогенізованого);
- 2) проаналізувати моделі нелінійної деформації, тріщиноутворення та поведінки СФБ при високих рівнях навантаження;
- 3) оцінити можливості та обмеження сучасних програмних комплексів при моделюванні СФБ-елементів;
- 4) визначити переваги та недоліки застосовуваних чисельних методик на основі зіставлення з експериментальними даними.

Матеріали та методи

У роботі використано метод порівняльного аналізу наукових публікацій, присвячених чисельному моделюванню сталевібробетонних конструкцій. Розглянуто підходи, що реалізовані в програмних комплексах ABAQUS, LIRA-FEM, ANSYS, з акцентом на типах моделювання фібри, тріщиностійкості та нелінійної поведінки.

Результати та обговорення

Метод скінченних елементів (МСЕ) є одним із найефективніших чисельних підходів до аналізу механічної поведінки будівельних конструкцій. Його суть полягає в дискретизації неперервного середовища на сукупність окремих скінченних елементів, що взаємодіють між собою в певних точках – вузлах. Завдяки цьому МСЕ дає можливість представити пружну систему як сукупність елементів з обмеженою кількістю ступенів свободи, що з'єднані між собою через вузли. Такий підхід сприяє формалізації всіх етапів розрахунку та уніфікації методики аналізу для різних типів конструкцій, зокрема стержневих систем, пластин, оболонок і об'ємних тіл.

На рис. 1 представлено схематичне зображення дискретизації тіла скінченними елементами та розташування вузлових точок.

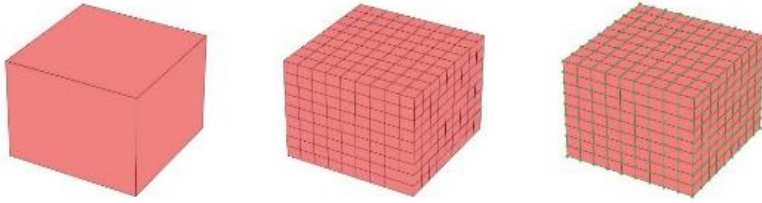


Рис. 1. Схематичне зображення дискретизації тіла скінченними елементами та визначення вузлових точок

Процес розрахунку конструкцій методом скінченних елементів включає кілька основних етапів, наведених нижче.

1. Побудова розрахункової схеми – створення математичної моделі конструкції у вигляді тривимірної геометричної структури або креслення.

2. Дискретизація – поділ об'ємної області на скінченні елементи з урахуванням оптимальних розмірів і форм, що забезпечує необхідну точність розрахунків.

3. Формування вузлових точок – визначення вузлів, через які здійснюється взаємодія між елементами.

4. Вказання міцнісних характеристик – встановлення фізико-механічних параметрів матеріалу (модуль пружності, густина, коефіцієнт Пуассона).

5. Прикладення навантажень та вказання граничних умов – моделювання дії зовнішніх сил, моментів і типів закріплень.

6. Чисельне розв'язання системи рівнянь рівноваги – визначення напружень, деформацій і переміщень конструкції під впливом навантажень.

Даний алгоритм є узагальненим і спрощеним – у практичних розрахунках можливі відхилення, що зумовлені специфікою програмного забезпечення, типом задачі та властивостями матеріалу. Наприклад, при виконанні нелінійного аналізу можуть знадобитися додаткові ітераційні методи, а під час дискретизації складних конструкцій – застосування адаптивних сіток.

Скінченно-елементна сітка (СЕС) складається зі скінченних елементів і вузлів, які забезпечують їхню взаємодію. Вибір кількості та типу елементів суттєво впливає на точність моделювання: чим детальніша сітка, тим вища точність розрахунку, однак це потребує кратного зростання обчислення.

Вузли є точками прикладання навантажень, закріплень і передавання сил між елементами. У МСЕ навантаження, навіть розподілені в реальних умовах, задаються у вигляді вузлових сил або моментів.

Для підвищення ефективності аналізу використовують адаптивні сітки, які автоматично уточнюються в зонах концентрації напружень, а також гібридні сітки, що поєднують різні типи елементів.

Усі граничні умови в МСЕ задаються через вузли, тому їхнє правильне формулювання має вирішальне значення для адекватності чисельної моделі реальним умовам роботи конструкції.

Метод скінченних елементів широко застосовується в механіці, фізиці та інженерії для розв'язання складних задач чисельного аналізу. Його суть полягає у заміні неперервної області (наприклад, тіла або конструкції) сукупністю скінченних елементів, для яких формулюються рівняння, що згодом об'єднуються в загальну систему. Такий підхід дозволяє розв'язувати інтегральні та часткові диференціальні рівняння, зводячи їх до системи звичайних рівнянь, які вирішуються стандартними чисельними методами – зокрема методами Ейлера, Рунге-Кутти та ін. Оскільки підготовка розрахункової моделі є трудомістким процесом, для її автоматизації застосовують препроцесори, які значно спрощують створення скінченно-елементної сітки – зокрема, на основі CAD-моделей.

Дані, сформовані за допомогою препроцесора, передаються в обчислювальне ядро методу скінченних елементів, яке розв'язує систему лінійних або нелінійних рівнянь:

$$K_{ij}u_j = f_j,$$

де u_j – переміщення, а f_j – зовнішні сили у вузлах.

Формування матриці жорсткості K залежить від типу задачі, наприклад, аналізу напружено-деформованого стану ферм чи пружних елементів. Більшість комерційних програмних продуктів містять бібліотеки готових елементів, що дає змогу адаптивно підбирати їх відповідно до поставленої задачі [5].

На сьогодні існує широкий спектр програмних продуктів, що реалізують метод скінченних елементів. Серед найбільш відомих можна відзначити ANSYS, Abaqus FEA, MSC Nastran, COMSOL Multiphysics, LS-DYNA, SolidWorks Simulation, Autodesk Inventor Nastran, Altair HyperWorks, Code_Aster, Simcenter 3D, Deal.II, Elmer FEM Solver, DIANA FEA, Femap, Z88 FE, FreeFEM++, Salome-Meca, GetDP, OpenFOAM, LibMesh, FeniCS, MATLAB, CalculiX, Zebulon, а також LIRA-FEM.

Серед українських фахівців і науковців, що займаються дослідженням і проектуванням будівельних конструкцій, широкого поширення набув програмний комплекс LIRA-FEM – багатофункціональне інженерне середовище для розрахунку конструкцій на основі методу скінченних елементів. Система дозволяє аналізувати вплив статичних і динамічних навантажень, виконувати підбір перерізів сталевих і залізобетонних елементів, моделювати ґрунтову основу та досліджувати поведінку споруд на всіх етапах життєвого циклу – від монтажу до експлуатації. Метод реалізовано у формі переміщень, тобто невідомими величинами є переміщення вузлів, що полегшує алгоритмізацію розрахункових моделей і сприяє автоматизації процесів. Завдяки цьому

LIRA-FEM дозволяє ефективно використовувати сучасні обчислювальні ресурси при аналізі складних та великомасштабних конструкцій.

На рис. 2 представлено результати розрахунку будівлі у вигляді переміщень.

На рис. 3 наведено приклади геометричних моделей лотка у формі напівтруби та труби, створених у середовищі LIRA-FEM [1, 2].

Застосування програмного комплексу LIRA-FEM дає змогу визначати числові значення згинальних моментів і напружень, що виникають у сталевіфібробетонних конструктивних елементах під впливом заданих навантажень. Порівняння отриманих результатів із граничними моментами, розрахованими теоретично, дозволяє оцінити доцільність подальшої експлуатації таких конструкцій в конкретних умовах навантаження [1-3].

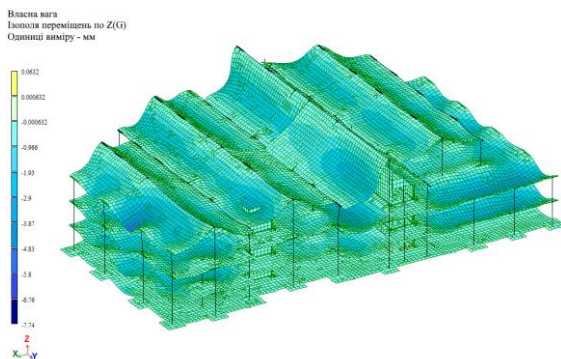


Рис. 2. Результат розрахунку методом скінченних елементів у вигляді переміщень [4]

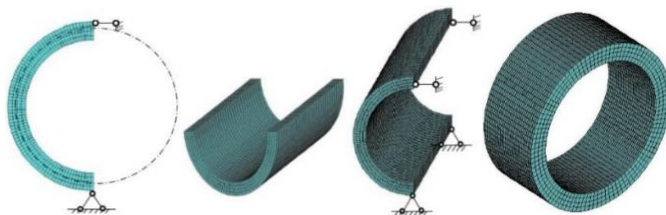


Рис. 3. Модель лотка у формі напівтруби і елемента кільцевого перерізу

Раніше аналіз методом скінченних елементів здебільшого здійснювався у формі числових таблиць, що ускладнювало виявлення критичних зон напружень і деформацій. Із розвитком програмного забезпечення цей процес було значно спрощено завдяки впровадженню

графічних інтерфейсів для візуалізації результатів. Постпроцесори автоматично формують кольорові контури, які відображають рівні напружень і деформацій у моделі, забезпечуючи наочне представлення напруженого стану конструкції. У багатьох випадках така візуалізація є співставною за інформативністю з фотореалістичними результатами експериментальних досліджень [5].

Окрім того, сучасні програмні комплекси підтримують паралельні обчислення та GPU-акселерацію, що суттєво підвищує швидкість розв'язання великих систем рівнянь. Водночас ефективність таких обчислень залежить від типу задачі, розміру моделі та специфіки обраного програмного середовища.

На рис. 4 представлено результати розрахунків ізополів напружень для нерозрізної сталевібробетонної балки [6], а також для тонкостінної конструкції покриття у формі гіперболічного параболоїда з СФБ [3].

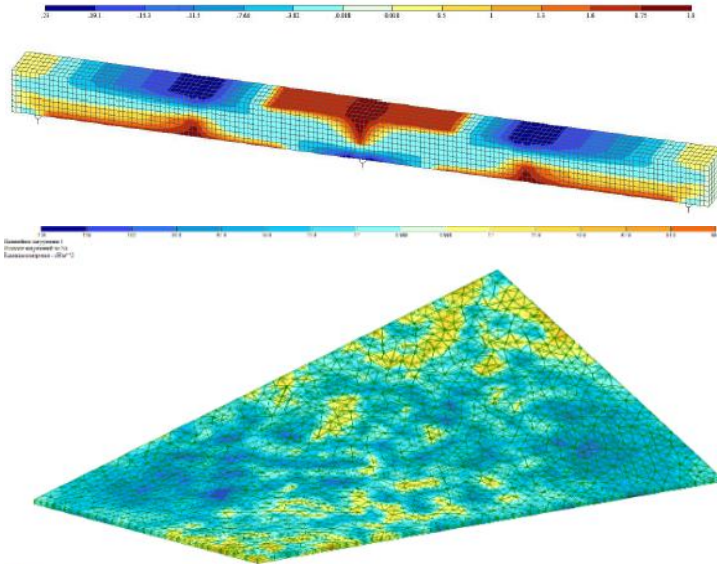


Рис. 4. Ізополя напружень у нерозрізній СФБ-балці та СФБ-оболонці

Дослідження композитних матеріалів у контексті методу скінченних елементів є складнішим завданням порівняно з аналізом однорідних матеріалів, оскільки композити мають неоднорідну структуру та вимагають спеціалізованих підходів до визначення їхніх механічних характеристик.

Зокрема, при моделюванні СФБ конструкцій слід враховувати, що цей матеріал складається з компонентів, які демонструють різні механічні

властивості залежно від виду напруженого стану – розтягу, стиску чи згину. Це зумовлює розбіжності у значеннях пружних сталей та потребує уточнення підходів до чисельного моделювання.

При чисельному моделюванні фібробетонних конструкцій методом скінченних елементів застосовуються два основні підходи до врахування впливу сталевих фібр: дискретний та гомогенізований.

У дискретному підході кожне волокно моделюється як окремий елемент, що дозволяє детально відтворити локальні ефекти, але значно ускладнює розрахункову модель. Натомість у гомогенізованому підході фібробетон розглядається як ефективно однорідний композитний матеріал із зведеними (усередненими) механічними характеристиками. Такий підхід є більш поширеним у практиці, оскільки знижує обчислювальні витрати.

Ключовими параметрами сталевих фібр, що впливають на результати чисельного моделювання, є її довжина, діаметр, геометрична форма, механічна міцність та об'ємна концентрація. Їх урахування має важливе значення для правильної оцінки жорсткості матеріалу та його тріщиностійкості. Найчастіше гомогенізований підхід реалізується шляхом коригування діаграми «напруження–деформації» бетону, що дозволяє враховувати ефект підсилення в зоні розтягу після утворення тріщин.

Наприклад, у роботі [7] запропоновано методику розрахунку деформування конструктивних елементів, виготовлених із композитів, з урахуванням різномодульності їхніх компонентів за умов статичних і динамічних навантажень з метою підвищення точності розрахунків.

На відміну від традиційних підходів, які зазвичай враховують лише зростання напружень розтягу в бетоні під впливом сталевих фібр, у дослідженні [8] окремо аналізується внесок трьох складових: бетонної матриці, класичного армування та сталевих фібр. Такий підхід є сучасним і перспективним для моделювання конструкцій з композитних матеріалів.

У [9] також доведено, що моделювання методом скінченних елементів у середовищі ABAQUS дозволяє ефективно прогнозувати схему пошкоджень, низхідну ділянку кривої «навантаження–переміщення» та кінцеві зміщення, забезпечуючи достовірну оцінку пластичності конструкції та її енергопоглинальної здатності. Отримані аналітичні дані підтверджуються результатами експериментальних випробувань.

У дослідженні [10] проведено аналіз чутливості параметрів матеріалу залізобетонної балки з дисперсним армуванням сталевими фібрами (SFRC) під час згину, з використанням методу глобальної дисперсії в поєднанні з волоконною скінченно-елементною моделлю. Метою роботи є визначення тих параметрів матеріалу, невизначеність яких має найбільший вплив на механічну поведінку SFRC-балки. Для перевірки ефективності обраного підходу виконано числове моделювання згинальної поведінки балки SFRC.

У дослідженні [11] для чисельного аналізу поведінки сталевих фібробетону реалізовано користувальну модель у програмному

середовищі MSC Marc на основі багаторівневої модельної концепції. Необхідні параметри (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границя міцності на стиск і розтяг) визначалися експериментально або розраховувалися за допомогою субмоделей. Рисунок 5 демонструє високу відповідність між чисельними та експериментальними результатами при центральному навантаженні на площі 50×50 мм. Модель достовірно відображає пластичну поведінку СФБ, зокрема, множинне тріщиноутворення. На відміну від крихкого руйнування неармованих зразків, СФБ руйнується з локалізацією руйнування.

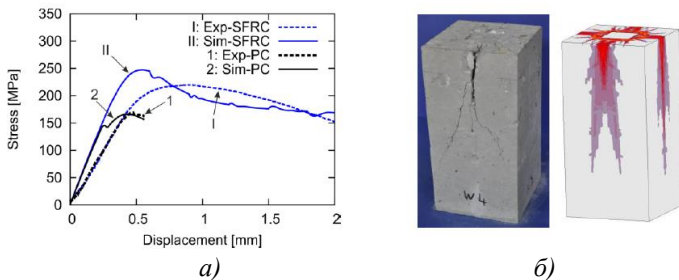


Рис. 5. а) залежність напруження від переміщення для зразків із СФБ та неармованого бетону; б) характер утворення тріщин у зразку із СФБ [11]

Процес руйнування залізобетону бетону має наступний характер: утворення тріщин у зоні розтягу; пластичне деформування в зоні стиску; текучість арматури під дією навантаження.

Числове моделювання тріщиноутворення в бетонних конструкціях є важливим інструментом оцінки їхньої міцності та довговічності. Одним із ключових завдань у цьому контексті є точне визначення траєкторії розвитку тріщин, зокрема в зоні розтягу. У дослідженні [12] крихке руйнування матеріалу моделювалося окремо, що дозволило прогнозувати характер поширення тріщин у залізобетонних елементах.

Для підвищення точності таких прогнозів у [12] було розглянуто різні варіанти дискретизації розрахункової області. Встановлено, що застосування дрібної сітки є критично важливим для коректного відображення полів напружень і деформацій, особливо за дії ударного навантаження.

Результати аналізу показали, що більшість тріщин у дослідних плитах поширювалися радіально – від центру до країв, тоді як локалізоване руйнування зосереджене в центральній частині прольоту. Це пов'язано зі зниженням жорсткості бетонної поверхні в зоні розтягу. Порівняння числового моделювання з/б-плит з експериментальними результатами, представленими на рис. 6, підтверджує, що оптимальний вибір сітки та

врахування потенційних траєкторій поширення тріщин забезпечують достовірне прогнозування характеру їх розвитку [12].

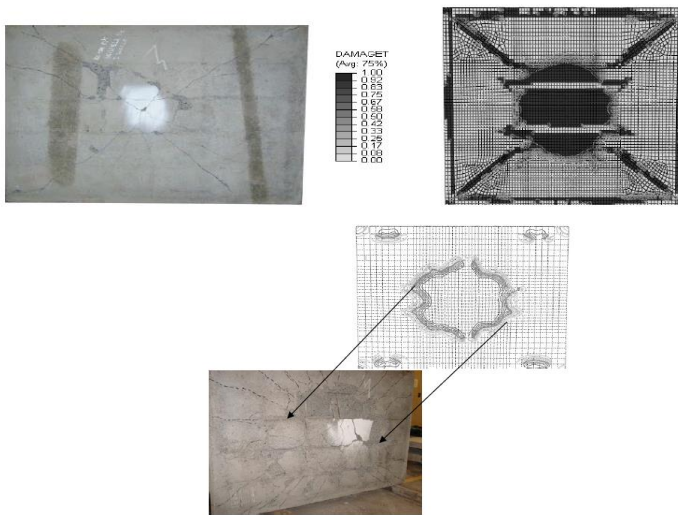


Рис. 6. Тріщиноутворення в експериментальному та чисельному дослідженнях

Для достовірного відтворення механічної поведінки сталевібробетону в умовах нелінійного деформування застосовуються ітераційні чисельні методи, які враховують пластичність сталі та поступове зниження міцності бетону при розтягу.

При чисельному моделюванні використовуються моделі розподілених тріщин (smeared crack) або окремих тріщин (discrete crack), які дозволяють достовірно відображати процес тріщиноутворення в матеріалі.

Застосування таких моделей дає змогу оцінити граничну несучу здатність конструкцій, яка зберігається завдяки дії сталевібробетону, що виконує функцію «зшивання» тріщин та забезпечує залишкову жорсткість і енергопоглинання.

Висновки

У статті розглянуто особливості моделювання роботи сталевібробетонних елементів із використанням методу скінченних елементів. Застосування цього підходу дає змогу детально аналізувати напружено-деформований стан конструкцій, прогнозувати їхню поведінку під дією навантажень і приймати обґрунтовані конструктивні рішення.

Результати чисельного моделювання засвідчують покращення механічних характеристик СФБ елементів порівняно з традиційним залізобетоном. Зокрема, додавання сталеві фібри збільшує міцність на розтяг, зменшує інтенсивність тріщиноутворення. При цьому характер руйнування змінюється з крихкого на пластичний, що забезпечує підвищену довговічність і надійність в експлуатації.

Високу точність чисельного прогнозування забезпечують такі чинники, як коректне формулювання граничних умов, вибір відповідного типу скінченних елементів і оптимальна дискретизація сітки. Аналіз результатів підтверджує, що МСЕ-моделювання відтворює тріщиноутворення у СФБ-елементах, що узгоджується із даними експериментальних досліджень.

Таким чином, метод скінченних елементів є ефективним інструментом для встановлення роботи сталеві фібробетонних конструкцій. Він забезпечує точну кількісну оцінку напружено-деформованого стану, проектної міцності та довговічності, що робить його перспективним методом у проектуванні та оптимізації композитних залізобетонних систем.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Andriichuk, O. V., Yasiuk, I. M. (2021). Doslidzhennia roboty stalefibrobetonnykh lotkiv pry dii odnorazovykh navantazhen' za dopomohoiu prohramnoho kompleksu Lira. Resursoekonomichni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy, 40, 79-86. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i40.012> .
2. Andriichuk, O. V. (2014). Zastosuvannia prohramnoho kompleksu Lira pry doslidzhenni roboty stalefibrobetonnykh elementiv kil'tsevoho pereryzu za dii odnorazovykh navantazhen'. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi, 1, 3-11.
3. Andriichuk, O. V., Hryhorchuk, A. B., Uzhehov, S. O. (2017). Hiperbolichnyi paraboloid zi stalefibrobotonu pry dii odnorazovykh navantazhen' za dopomohoiu

програмного комплексу LIRA-SAPR. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 34, 176-183. http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2017_34_24

4. Програма для розрахунку за методом скінченних елементів. Програми для розрахунку та проектування конструкцій. <https://www.liraland.ua/solutions/functionality/fem.php> (accessed: 22.02.2025).

5 Roylance, D. 5.3: Аналіз скінченних елементів. LibreTexts – Українська. <https://ukrayinska.libretexts.org> (accessed: 22.02.2025).

6. Ninichuk, M. V. (2021). Napruzhenno-deformovanyi stan ta rozrakhunok kombinovano-armovanykh nerozriznykh zalizobetonnykh balok: dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk, 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. Луцький національний технічний університет. 181 с.

7. Smoliankova, T. M. (2021). Matematyчне modeliuвання mekhanichnykh kharakterystyk voloknystykh kompozytiv iz riznomodul'nymy komponentamy: dysertatsiia doktora filosofii, 113 – Прикладна математика. Запорізький національний університет. 133 с.

8. Lee, S.-C., Cho, J.-Y., Vecchio, F. J. (2016). Analysis of steel fiber-reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Structural Journal, 113(2), 275-286. <https://doi.org/10.14359/51688474> .

9. Fares, A. M. H., Bakir, B. B. (2024). Parametric study on the flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams utilizing nonlinear finite element analysis. Structures, 65, Article 106688. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106688> .

10. Blagojevic, P., Blagojevic, N., Kukaras, D. (2021). Behavior of steel fiber-reinforced concrete beams under bending: Probabilistic numerical modeling and sensitivity analysis. Applied Sciences, 11(20), Article 9591. <https://doi.org/10.3390/app11209591> .

11. Breitenbücher, R., Meschke, G., Song, F., Hofmann, M., Zhan, Y. (2014). Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads. Proceedings of the FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop: Fiber Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications, 417-429.

12. Tahmasebinia, F., Remennikov, A. (2008). Simulation of the reinforced concrete slabs under impact loading. In E. E. Gad & B. Wong (Eds.), Australasian Structural Engineering Conference (ASEC), 26-27 June 2008, Melbourne, Australia (p. 101). The Meeting Planners. <http://ro.uow.edu.au/engpapers/3224> .

Література

1. Андрійчук, О. В., Ясюк, І. М. (2021). Дослідження роботи сталевібробетонних лотків при дії одноразових навантажень за допомогою програмного комплексу Ліра. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 40, 79-86. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i40.012> .

2. Андрійчук, О. В. (2014). Застосування програмного комплексу Ліра при дослідженні роботи сталевібробетонних елементів кільцевого перерізу за дії одноразових навантажень. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 1, 3-11.

3. Андрійчук, О. В., Григорчук, А. Б., Ужegov, С. О. (2017). Гіперболічний параболоїд зі сталевібробетону при дії одноразових навантажень за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 34, 176-183. http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2017_34_24 .

4. Програма для розрахунку за методом скінченних елементів. Програми для розрахунку та проектування конструкцій. <https://www.liraland.ua/solutions/functionality/fem.php> (дата звернення: 22.02.2025).

5. Roylance, D. 5.3: Аналіз скінченних елементів. LibreTexts – Ukrayinska. <https://ukrayinska.libretexts.org> (дата звернення: 22.02.2025).

6. Нінічук, М. В. (2021). Напружено-деформований стан та розрахунок комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балок: дисертація кандидата технічних наук, 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. Луцький національний технічний університет. 181 с.

7. Смолянкова, Т. М. (2021). Математичне моделювання механічних характеристик волокнистих композитів із різномодульними компонентами: дисертація доктора філософії, 113 – Прикладна математика. Запорізький національний університет. 133 с.

8. Lee, S.-C., Cho, J.-Y., Vecchio, F. J. (2016). Analysis of steel fiber-reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Structural Journal*, 113(2), 275-286. <https://doi.org/10.14359/51688474> .

9. Fares, A. M. H., Bakir, B. B. (2024). Parametric study on the flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams utilizing nonlinear finite element analysis. *Structures*, 65, Article 106688. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106688> .

10. Blagojevic, P., Blagojevic, N., Kukaras, D. (2021). Behavior of steel fiber-reinforced concrete beams under bending: Probabilistic numerical modeling and sensitivity analysis. *Applied Sciences*, 11(20), Article 9591. <https://doi.org/10.3390/app11209591> .

11. Breitenbücher, R., Meschke, G., Song, F., Hofmann, M., Zhan, Y. (2014). Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads. *Proceedings of the FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop: Fiber Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications*, 417-429.

12. Tahmasebinia, F., Remennikov, A. (2008). Simulation of the reinforced concrete slabs under impact loading. In E. E. Gad & B. Wong (Eds.), *Australasian Structural Engineering Conference (ASEC)*, 26-27 June 2008, Melbourne, Australia (p. 101). The Meeting Planners. <http://ro.uow.edu.au/engpapers/3224> .

| Відомості про статтю: | Article information: |
|---|-------------------------------------|
| Отримано 20.05.2025 | Received 20.05.2025 |
| Отримано у доопрацьованому вигляді 29.05.2025 | Received in revised form 29.05.2025 |
| Прийнято 01.06.2025 | Accepted 01.06.2025 |
| Опубліковано 25.06.2025 | Published 25.06.2025 |

O. V. Andriichuk

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6275-097X>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

D. Y. Hromov

Postgraduate student
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

Modeling the behavior of steel fiber reinforced concrete structures using the finite element method

How to Cite:

Andriichuk, O. V., Hromov D. Y. (2025). Modeling the behavior of steel fiber reinforced concrete structures using the finite element method. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 5-18. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-01)

Abstract. The article examines the specific features of numerical modeling of steel fiber reinforced concrete (SFRC) structural elements using the finite element method (FEM). The relevance of the research is driven by the need for computer modeling and prediction of the stress-strain state of composite material structures, which is essential for the design of buildings and structures. The study analyzes approaches to incorporating steel fibers in numerical modeling, in particular, the discrete approach, where fibers are modeled as individual elements, and the homogenized approach, which is based on the averaging of the mechanical properties of the material in accordance with its composition. Examples of the implementation of these approaches in the software environments ABAQUS, ANSYS, and LIRA-FEM are provided. The accurate specification of input parameters and loading conditions has a significant impact on the reliability of the numerical simulation results.

Special attention is paid to modeling the nonlinear behavior of the material, including limit deformations, crack initiation and propagation, as well as the prediction of damage localization zones. The results of numerical modeling are analyzed and shown to be consistent with experimental (laboratory-scale) test data, particularly in terms of failure patterns, residual strength, and the energy absorption capacity of SFRC structures.

It has been determined that SFRC is characterized by increased crack resistance, alters the failure mechanism from brittle to ductile, and ensures the retention of load-bearing capacity after cracking. The finite element method is shown to be an effective tool for the quantitative assessment of the mechanical characteristics of SFRC elements, especially under combined loading conditions. The study concludes that FEM-based modeling is appropriate for use in engineering practice to justify structural solutions involving dispersed reinforcement in concrete structures.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, finite element method, numerical modeling, crack resistance, composite materials, nonlinear behavior, structural analysis.