

В І Д Г У К
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Яковенка Ігоря Анатолійовича
на тему: «Моделі деформування залізобетону на засадах механіки
руйнування», представленій на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук
за спеціальністю 05. 23. 01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди

Представлена дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 376 найменувань та 2 додатків. Робота викладена на 409 сторінках, у тому числі 304 сторінка основного тексту, який ілюструється 106 рисунками, містить 13 таблиць, 47 повних сторінок з рисунками і таблицями, 45 сторінок списку використаних джерел та 13 сторінок додатків. Структура та обсяг дисертації задовольняють вимогам, що висуваються до докторських дисертацій.

Актуальність вибраної теми. В розвитку теорії залізобетону можна відмітити декілька етапів: теорія, яка базувалася на положеннях теорії опору матеріалів, розглядаючи залізобетон як пружний комплексний матеріал; метод руйнівних зусиль та метод граничних станів, на якому базуються чинні нормативні документи проектування бетонних і залізобетонних конструкцій. Практично два покоління вчених присвятили свої дослідження останніх двох методів. Метод граничних станів відігравав і відіграє важливе значення в подальшому розвитку загальної теорії залізобетону, на його основі розроблені практично всі напрями розрахунку залізобетонних конструкцій. Але і цьому методу притаманна низка недоліків, які полягають в недостатньому розкритті особливостей механіки утворення і розвитку тріщин, деформування та самого процесу руйнування бетону та залізобетону. З цього випливає необхідність подальших поглиблених досліджень процесів, які відбуваються в залізобетоні під дією силових та несилових факторів з метою подальшого удосконалення методів розрахунку конструкцій з необхідною надійністю та економічністю.

Започаткування теорії розрахунку будівельних конструкцій можна віднести до середини XVII століття, коли Леонардо да Вінчі встановив, що несуча здатність колон прямо пропорційна площі і обернено пропорційна довжині, а Галілео Галілей – що міцність бруса на розтяг пропорційний площі і не залежить від його довжини. Подальше Е. Маріот встановив, що в згинальному брусі в нормальних перерізах виникає стиск і розтяг, в 1715 році Я. Бернуллі сформулював гіпотезу плоских перерізів, якою ми користуємося і сьогодні. А. Паран довів, що в перерізі існує рівновага між стискаючими і розтягуючими напруженнями, та вперше визначив момент опору перерізу (1713 р.). Користуючись цими досягненнями Луї Нав'є запропонував розраховувати конструкції за допустимими напруженнями (1826 р.). Бурхливий розвиток теорії залізобетону відбувався в XX столітті, коли А. Ф. Лолейт запропонував сформулював метод розрахунку за стадією руйнування

(1904 р.), що було закріплено в нормах проектування в 1938 р. В середині ХХ століття був розроблений новий метод розрахунку конструкцій – метод розрахунку за граничними станами (О. О. Гвоздєв, В. І Мурашов), який був закріплений в нормах 1955 року та постійно удосконалюється по теперішні час.

Початком розвитку теорії механіки руйнування матеріалів можна вважати, початок 1920-х років, коли А. А. Гріффітс, використовуючи положення механіки суцільного середовища, обґрунтував енергетичні умови руйнування та записав рівняння енергетичного балансу для нестійкого зростання тріщин. В своїх дослідженнях Гріффітс використав результати досліджень напруженого стану в зоні тріщини (пружній стан еліптичного отвору), які виконав Інґліс (1913 р.). На основі рівнянь Гріффітса в 1958 році Ірвін отримав формули для визначення компонентів напружень в околицях вершини тріщин, в яких використовується коефіцієнт K , який названий коефіцієнтом інтенсивності напружень, який поєднує в собі характер навантаження, пружні властивості зразка та конфігурацію тріщини. Не дивлячись на те, що положення Гріффітса вважаються класичними, ця теорія поступово удосконалюється, зважаючи на те, що вона розроблялася для однорідних ізотропних матеріалів (металеві сплави).

Аналізуючи наведене, можна прийти до висновку, що теорія залізобетону і теорія механіки руйнування розвивалися багато років паралельно, а тому неодноразово поставало і постає питання, що з метою подальшого практичного використання отриманих результатів залежить, головним чином, від успішного об'єднання механіки суцільного середовища з базисними положеннями про властивості матеріалів, основами руйнування конкретних матеріалів, в даному випадку бетону і залізобетону, існуючими методами його розрахунку. З цих принципіальних позицій тема дисертаційної роботи актуальна.

В дисертаційній роботі автор поставив за мету: розвиток теорії тріщиностійкості, жорсткості стрижневих і плосконапружених залізобетонних конструкцій та побудова їх моделей деформування шляхом розробки трансформаційних двоконсольних елементів залізобетону, на основі синтезу гіпотез механіки твердого деформівного тіла та тонкого інструментарію механіки руйнування, які найбільш повно відображають реальний процес утворення, розвитку та розкриття тріщин при силових і деформаційних впливах та надають можливість ефективного проектування будівель і споруд із залізобетону. Відповідно до мети сформульована низка задач для вирішення.

Зв'язок досліджень з науковими програмами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в Національному авіаційному університеті за держбюджетною темою № 6/10.01.02 «Новітні технології проектування залізобетонних конструкцій, що зводяться та експлуатуються в складних інженерно-геологічних умовах» (номер державної реєстрації 0111U004461), № 6/10.01.02 «Комп'ютерне моделювання процесів життєвого циклу об'єктів

цивільного та транспортного будівництва» та № 36/10.01.02 «Побудова теорії опору складених залізобетонних конструкцій на основі механіки руйнування залізобетону та її комп'ютерне моделювання».

Об'єкт дослідження роботи відповідає пріоритетному напрямку, який відповідає Закону України «Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні» на 2011 – 2020 роки (стаття 4, пункт 6).

Короткий аналіз основного змісту дисертації. В першому розділі дисертації виконано критичний огляд існуючих розрахункових пропозицій і результатів експериментальних досліджень тріщиностійкості і жорсткості стрижневих і плоско напружених залізобетонних конструкцій, у тому числі з використанням механіки руйнування. Коротко описано вклад багатьох вчених в розробку даної проблеми. Автор дисертації відмічає, що практично всі відомі методи розрахунків тріщиностійкості та жорсткості залізобетонних елементів не враховують ефекти, які виникають у залізобетонних елементах після порушення його суцільності, а врахування цього ефекту дозволяє не тільки досягти уточнення розрахунків залізобетонних конструкцій, але і пояснити фізичний зміст багатьох явищ, які спостерігаються при проведенні експериментів. Існуючі методи розрахунку залізобетонних конструкцій з використанням механіки руйнування на сьогодні далекі від досконалості. В кінці розділу сформульовані задачі досліджень.

Другий розділ дисертації присвячений аналізу сучасного рівня розвитку механіки руйнування залізобетону та можливості його вдосконалення і використанні в побудові моделей деформування. Розглянуті моделі нелінійної механіки руйнування стосовно до розрахунків бетону та залізобетону (модель умовної тріщини, модель поясу тріщин, двопараметрична модель), розглянуті механізми утворення і розвитку тріщин. Тут же проаналізовані робочі передумови розвитку механіки руйнування залізобетону стосовно його розрахунку. На підставі виконаного аналізу автор приходить до висновку, що встановлений напружено-деформований стан в околиці тріщини дозволяє розробити методи механіки руйнування для залізобетону. На підставі цього в роботі сформульовані основні гіпотези і передумови, які повинні бути покладені в основу розрахунків залізобетонних конструкцій. В цьому розділі розроблена структурно-логічна схема виконання досліджень.

Аналізу, розвитку і підтвердженню основних гіпотез і напрямків розвитку теорії залізобетону, а також побудові робочих гіпотез на сучасному рівні її еволюції присвячений **третій** розділ дисертації. Підтверджено ефект порушення суцільності залізобетонних конструкцій і сформульовано нову гіпотезу зосередженого зсуву у шві між бетонами (між бетоном та арматурою), яка дозволила знизити на порядок диференціальні рівняння складених стрижнів, які запропонував А.Р. Ржаніцин.

В розділі докладно розглядається розрахунок залізобетонних конструкцій за граничними станами (мета розрахунків, розрахункові коефіцієнти і розрахункові

навантаження, характеристики матеріалів, розрахунок на міцність та витривалість, на утворення та розкриття тріщин, розрахунок за деформаціями).

Заслужовує на увагу критичний аналіз ефектів порушення суцільності в залізобетоні, де докладно розглядаються рішення Мурашова В. І., та Я. М. Немировського. Автор вважає, що для успішного дослідження напружено-деформованого стану в околиці з тріщиною необхідно розробити повну класифікацію тріщин, які виявлені в залізобетонних конструкціях при проведенні експериментальних досліджень. Як наслідок за участю здобувача розроблена класифікація тріщин, яка встановлює три типи тріщин, виникнення і розташування яких залежить від діючих зусиль та граничних, які може витримати конструкція перед утворенням тріщин. Також запропонована більш повна класифікація базових тріщин, в основу якої покладена геометрична, силова (деформаційна) і міжсередовищна концентрація напружено-деформованого стану.

Четвертий розділ дисертації, в якому викладені основні теоретичні дослідження, присвячений розвитку функціоналу механіки руйнування стосовно залізобетону шляхом розробки серії нових двоконсольних елементів при наявності різних типів тріщин, що виникають у залізобетонних конструкціях при різних видах деформацій. Запропоновані умови виділення умовних двоконсольних елементів, яким в роботі надається дуже важлива функція, адже вони використовуються як сполучена ланка між залежностями механіки руйнування і теорією залізобетону. Використовуючи прийняті умови, визначені розміри двоконсольних елементів, при цьому встановлена зона виникнення стискаючих напружень в навколоарматурній зоні, яка пропонується в першому наближенні прийматися рівною півтора діаметра арматури, та прийнято, що розтягуючі напруження не повинні перевищувати міцності бетону на розтяг. В подальшому всі параметри напружено-деформованого консольного елемента визначені з рівнянь рівноваги.

Як результат теоретичних досліджень, автор роботи розвинув гіпотези механіки руйнування стосовно врахування ефекту порушення суцільності залізобетонних конструкцій при різних силових впливах зі спрощеним її енергетичним потенціалом та отримав нову аналітичну залежність, яка пов'язує дотичні зусилля, що виникають в безпосередній близькості від тріщин з довжиною її розвитку через питому енергію утворення нових поверхневих тріщин.

Результати теоретичних досліджень підтвердили ефективність запропонованих двоконсольних елементів, які виступають як трансформаційні елементи між залежностями механіки руйнування і рівняннями теорії залізобетону.

Розробці розрахункових моделей деформування залізобетонних конструкцій на основі механіки руйнування присвячений *п'ятий* розділ дисертації. Розглянуті моделі утворення та ширини розкриття тріщин різних рівнів і типів, запропоновані нові підходи до визначення жорсткості залізобетонних конструкцій.

В основу практичної оцінки опору розтягнутого бетону між тріщинами, ширини їхнього розкриття і відстані між ними запропоновані додаткові

передумови, які стосуються обмеження деформацій бетону розтягу, виділення декількох рівнів утворення тріщин, а розкриття тріщин представляється як накопичення відносних умовних зосереджених взаємних зсувів арматури і бетону на ділянках, розташованих по обидві сторони від тріщин. Для визначення відносних взаємних зміщень між арматурою і бетоном запропоновано рівняння, а також наводяться формули для визначення віддалі між тріщинами та, як важливий результат, формула для визначення ширини розкриття тріщин на рівні арматури.

В дослідження жорсткості елементів автор приділив велику увагу впливу наявності похилих тріщин, що в чинних нормах не враховується.

З метою перевірки запропонованих деформаційних моделей під керівництвом та за участю автора проведена значна кількість експериментальних досліджень, методика проведення яких та результати наведені в розділі 6. В експериментах перевірялася достовірність запропонованих моделей деформування залізобетонних конструкцій, багаторівневий процес утворення тріщин, характер опору розтягнутого бетону між тріщинами, ширини розкриття тріщин та відстані між ними

Залізобетонні конструкції у вигляді балок та плоских плит випробувались у горизонтальному положенні (з вільним доступом до розтягнутої зони), що дозволяє детально вивчити картину утворення, розвитку і розкриття тріщин. Випробувальна установка дозволяла реалізовувати намічені схеми для стрижневих і плосконапружених залізобетонних конструкцій. В досліді належна увага надавалися вимірюванню деформацій та ширини розкриття тріщин, для чого використовувалися механічні прилади з високою точністю та система тензорезисторів, в тому числі і розетки з них, які поділялися на групи залежно від мети вимірювання.

Програма досліджень включала лабораторні випробування п'яти серій залізобетонних конструкцій. Основні зразки представляли собою балки з номінальними розмірами $160 \times 25 \times 10$ см, 6 складених балок та 8 плосконапружених плит. Розроблена методика експериментальних досліджень охоплює широке коло питань, які необхідні при розробці нового розрахункового апарату залізобетонних конструкцій із використанням положень механіки руйнування.

У виконаних експериментальних дослідженнях встановлено, що аналіз характеру утворення і розвитку тріщин показує наявність не одного (як це прийнято в теорії В. І. Мурашова), а декількох рівнів виникнення тріщин, аж до руйнування залізобетонних конструкцій; ширина розкриття нормальних тріщин на рівні осі арматури у декілька разів менша, ніж на деякому (2 – 3 діаметра) віддалені від її осі, тобто, арматура стримує розкриття тріщини, чинить протидію розкриттю її берегів. Виникаючі при цьому реакції викликають місцеве стиснення у бетоні в околиці тріщини у зоні біля арматури, що можна вважати ефектом порушення суцільності. Підтверджені особливості, які характеризують двоконсольний елемент в залізобетоні і специфіку його виділення.

В цьому розділі дисертації наведений чисельний аналіз та порівняльне оцінювання розроблених моделей деформування з існуючими методами розрахунку та нормативними документами. Тут же також наведений аналіз зарубіжних експериментів з залізобетонною рамою з плосконапруженою стіною діафрагмою.

В розділі розроблені і наведені розрахункові алгоритми для визначення утворення тріщин, відстані між тріщинами, утворення першої похилої тріщини, утворення похилих тріщин другого рівня. Виконаний чисельний аналіз параметрів запропонованих моделей деформування залізобетону, де детально проаналізовано залежність коефіцієнта врахування роботи розтягнутого бетону від площі поперечного перерізу арматури. Доведено, що при збільшенні площі поперечного арматури функціональна відстань між тріщинами поступово (плавно) збільшується.

Для оцінки ефективності розроблених теоретичних моделей розрахунку ширини розкриття та відстаней між тріщинами за запропонованими моделями була визначено ширину розкриття тріщин звичайних і попередньо напружених залізобетонних балок із важкого бетону класів C12/15–C40/50 з хомутами і без хомутів, монолітного і складеного перерізу, завантажених зосередженим і рівномірно-розподіленим навантаженням в експлуатаційній стадії роботи. Для порівняння аналогічні обчислення були виконані також за нормативною методикою.

Результати співставлення дослідної та розрахункової ширини розкриття тріщин показують (оброблено 294 дослідів), що для запропонованої моделі середня відношення розрахункової ширини розкриття тріщин до експериментального значення складає 0,683 при коефіцієнті варіації, рівним 13,46%, а порівняно з шириною розкриття тріщин, визначених за нормативною методикою ці показники відповідно рівні 0,589 і 31,74%.

Оцінка точності розглянутих розрахункових моделей деформування залізобетону виконувалася відповідно до загальноприйнятої методики визначення точності та має такі значення: при забезпеченості $\pm 10\%$ за нормативною методикою точність складає 22,75%, а за методикою автора – 43,12%, при забезпеченості 40% - відповідно 82,12% і 99,81%. Аналіз наведених показників точності свідчить про те, що теоретичні положення тріщиностійкості, розроблені автором, більш точно описують процес тріщиноутворення в залізобетоні.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність. Достовірність отриманих результатів забезпечується:

- при розробці моделей тріщиностійкості і жорсткості залізобетонних конструкцій використані закономірності механіки твердого деформованого тіла та основних перевірених положень теорії залізобетону;

- результатами досконало виконаних автором та за його участю експериментальних досліджень, в яких досконало вивчені особливості

тріщиноутворення в залізобетонних елементах і які підтвердили запропоновані його моделі та методи розрахунків утворення та розкриття тріщин;

- виконаним порівняльним аналізом, який підтверджує ефективність запропонованих моделей деформування і впровадженням у нормативні документи та практику проектування;

- апробацією результатів роботи на міжнародних, всеукраїнських науково-технічних конференціях, симпозіумах, конгресах.

Новизна роботи та її значення для науки. Новизна результатів роботи полягає в наступному:

- встановлені нові ефекти опору залізобетонних конструкцій та уточнені робочі гіпотези механіки руйнування твердого тіла (ефект порушення суцільності, гіпотеза зосередженого зсуву у шві між бетонами, гіпотеза плоских перерізів із урахуванням зосередженого зсуву у місті контакту арматури з бетоном);

- запропоновано уточнену класифікацію дискретних тріщин у стрижневих і плосконапружених залізобетонних конструкцій залежно від геометричної, силової та міжсередовищної концентрації напружено-деформованого стану;

- для поєднання розрахункових положень механіки твердого тіла та положень теорії залізобетону з метою отримання найбільш удосконалених залежностей для описання процесів тріщино утворення та деформування залізобетонних конструкцій запропонована серія умовних двоконсольних елементів для різних видів опору (розтяг, згин, позацентровий стиск, за наявності однорядного та багаторядного армування);

- виконано подальший розвиток теорії механіки руйнування стосовно залізобетонних конструкцій, який поєднує в собі сучасні досягнення в механіці твердого тіла та в теорії залізобетону;

- запропоновані нові розрахункові моделі залізобетонних конструкцій для визначення утворення тріщин, опору розтягнутого бетону між тріщинами у залізобетонних конструкціях, відстані між тріщинами і ширини розкриття тріщин, а також запропонована удосконалена методика визначення жорсткості залізобетонних конструкцій на різних їх ділянках з урахуванням запропонованої класифікації тріщин;

- отримані нові експериментальні дані досліджень тріщиностійкості і жорсткості стержньових та плосконапружених залізобетонних елементів.

Практичне значення роботи. Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що запропоновані моделі деформування залізобетону на засадах механіки руйнування, завдяки найбільш повного врахування параметрів і особливостей деформування арматури і бетону, дозволяють отримати більш достовірні рішення і виявити резерви для ефективного використання матеріалів.

Результати дисертаційної роботи використані при розробці ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво у сейсмічних районах України» і будуть враховані при розробці Змін №1 (довідка ДП НДІБК від 22.12.2017 р.

за № 220-2772), а також при проектуванні окремих будівельних об'єктів та в навчальному процесі, що підтверджено відповідними довідками.

Повнота викладу основних положень в опублікованих працях. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 60 наукових працях, у тому числі в 3 монографіях у співавторстві, 24 наукових статтях у фахових професійних виданнях, внесених до переліку МОН України, 18 наукових статтях в іноземних спеціалізованих фахових виданнях (із них 14 наукових робіт, що входять до наукометричних баз даних, у тому числі 5 Scopus та 2 у Web of Science), 9 наукових працях за матеріалами міжнародних науково-практичних конференцій, 1 навчального посібника із розрахунку залізобетонних конструкцій, 2 нормативних документах України і 2 патентах України на корисну модель. Основні положення дисертації викладені в опублікованих працях в повній мірі.

Матеріали дисертації доповідалися на багатьох науково-технічних конференціях різних рівнів, які відбувалися в різних містах України та за кордоном.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Здобувач захистив кандидатську дисертацію на тему: «Розрахунок ширини розкриття тріщин позацентрово стиснутих залізобетонних конструкцій, підсилених при реконструкції», на яку є посилання в підрозділі 4.2 оглядового характеру.

Зауваження за змістом дисертації.

1. В дисертації наголошується, що в ній вирішені важлива науково-технічна проблема тріщиностійкості та жорсткості залізобетону на засадах тонкого інструментарію механіки руйнування (стор. 8, 348), але не наводиться роз'яснення, як розуміти сполучення «тонкий інструментарій». На наш погляд, не можна ставити на різні рівні положення механіки руйнування і положення теорії залізобетону, так як на даний час вони мають однакову надійність.

2. В заголовках розділів 2 і 5 і в тексті говориться про побудову моделей деформування залізобетону за граничними станами другої групи, що є не коректним. ДБН В.1.2-14-2009 встановлює, що граничний стан це є стан, за якого подальша експлуатація будівельного об'єкта недопустима, а відповідні норми встановлюють кількісні показники настання граничного стану і містять методи розрахунку конструкцій за граничними станами.

3. Перший і другий розділи є оглядовими, частково оглядовим є і третій розділ, в якому аналізується сучасний стан розвитку теорії залізобетону (граничний стан, навантаження, розрахункові коефіцієнти, розрахунки за міцністю та витривалістю, на утворення та розкриття тріщин тощо). Ці відомості загальновідомі, викладені в підручниках і нормах проектування і їх можна було не наводити або розглянути в другому розділі. В той же час не наведено характеристика стадій роботи залізобетону (перша, друга), а посилання в тексті дисертації на них є.

4. Для поєднання розрахункових положень механіки твердого тіла та положень теорії залізобетону запропонована серія умовних двоконсольних елементів для різних видів опору, але визначення розмірів умовних консолей висвітлено не достатньо, експериментально не доведено межу консолей в тілі бетону.

5. Оскільки в підрозділі 5.1 наведена методика визначення опору елементів утворенню похилих тріщин третього типу, бажано було б розкрити фізичний процес їх утворення і чи можливо тут використати теорію максимальних дотичних напружень?

6. В роботі наводяться результати випробування арматури для дослідних зразків, а для бетону наводяться тільки класи, експериментального визначення його механічних властивостей не наводиться.

7. У висновках до розділу 6 зазначається, що тріщини, які виникають на віддалі 1,5 ... 2 діаметра перевищують ширину розкриття тріщин на рівні осі арматури в 2 ... 3 рази. В експериментальних дослідженнях вимірювання ширини розкриття тріщин відбувалося на віддалі трьох діаметрів, а перевищення досягало 2,6 рази (рис. 6.14, рис. 6.15). В розділі 7 ці рисунки дублюються (рис. 7.5 та рис. 7.6). Доцільно було б встановити положення тріщин з максимальною шириною залежно від відношення діаметра арматури до довжини тріщини або навпаки.

8. Автор не зазначає, чи можна нормально експлуатувати конструкції, в яких допустима ширина розкриття тріщин на рівні арматури за нормами складає 0,4 мм, адже вище арматури ця ширина може досягти 1,2 мм, а вона вже може бути наскрізною.

9. Розглядаючи зчеплення арматури з бетоном, автор зазначає, що на нього впливає міцність бетону та вид арматури, але не пояснює яким чином. Слід було б врахувати індекс Рема, що враховує профіль арматури, та міцність бетону, які визначають характер опору бетону витяганню арматури (зминання ребрами, зріз бетону між ребрами). Отримані граничні значення зчеплення в експериментах бажано було б перевірити за формулою М. М. Холмянського.

Висновок. Наведені зауваження більше мають, в основному, методичний характер і не знижують наукову і практичну цінність дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Яковенка І. А. відповідає вимогам пунктам 9 і 10 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника». В дисертації отримані нові науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, які полягають в подальшому розвитку теорії механіки руйнування стосовно залізобетонних конструкцій, що в сукупності є значним досягненням для розвитку теорії залізобетону.

Яковенко Ігор Анатолійович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди.

Завідуючий кафедрою промислового, цивільного
будівництва та інженерних споруд
Національного університету водного господарства
та природокористування,
Заслужений працівник народної освіти України,
доктор технічних наук – професор

 С. М. Бабич.

Підпис професора Бабича С. М. засвідчую:
Вчений секретар

 В. І. Давидчук

