

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Яковенка Ігоря Анатолійовича на тему: «Моделі деформування залізобетону на засадах механіки руйнування», представлена до захисту у спеціалізовану вчену раду Д 44.052.02 при Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01-будівельні конструкції, будівлі та споруди.

### Актуальність теми дисертації.

Однією з необхідних і важливих проблем для практики проектування і зведення конструкцій, у тому числі й залізобетонних, є оцінювання їх ресурсу. Тенденція, яка має місце на теперішній час, і яка обумовлена значними труднощами, зумовлює, в основному, вивчення особливостей появилення яких-небудь деструкцій виключно в точці, а потім в перетині або уздовж нормалі до деформованої поверхні. Далі, як правило, йде логіко-феноменологічний ланцюжок міркувань про можливий колапс всієї системи. Наслідком подібного підходу є поява великої кількості критеріїв граничних станів (в минулому – критеріїв міцності), які з тією чи іншою довірчою ймовірністю оцінюють працездатність конструктиву. І тут, як відомо, побудову загального напрямку навряд можна назвати успішною і, тим більше, перспективною.

Альтернативою перерахованого є методи і процедури механіки руйнування (МР), що базуються не на дослідження трансформацій компонентів тензорів напружень і деформацій, а на енергетичних принципах.

Адаптація алгоритмів, що сформовані в рамках експлуатації МР для залізобетонних конструкцій, не може бути реалізована формально, так як потребує створення достатнього складного й розгалуженого апарату переходу від моделей МР до моделей залізобетону. Тим не менш, ці дії цілковито виправдані, оскільки саме використання МР може, у підсумку, бути базою для визначення ресурсу конструкції в цілому. Це ствердження засноване на встановленому різноманітті локальної або глобальної деградації системи протягом її життєвого циклу.

Враховуючи незначну кількість результатів робіт, що присвячені дослідженням залізобетонних конструкцій, які отримані з позицій МР і носять в

певному сенсі, пionерний характер, допустимо констатувати **позитивність** такого напрямку.

Вбачаючи кеплеровську аналогію між ідеями К.Е. Інгліса і А.А. Гріффітса і оцінками опору залізобетону в рамках розрахунків по другій групі граничних станів, що прийняті в сучасній теорії залізобетону, автор представленої дисертації виводить на більш високий рівень коректноть опису процесу тріщиноутворення в позначених елементах.

У зв'язку з тим, що основним результатом представленого дослідження є сформовані теоретичні моделі (що важливо для кваліфікаційного рівня дисертації, зумовленого паспортом спеціальності) можна відмітити **доцільність і сучасність** їх для розвитку теорії залізобетону.

Слід також вказати на ту обставину, що рівень викладення представленого матеріалу дозволив досить акуратно обійти принцип «бритва Окама», що є в даному випадку проявом загальносистемного дуалізму. Дуалізм тут проявляється з одного боку, у вигляді галілеєвського «... неможна безпечно експлуатувати конструкцію, якщо не знати як вона буде помирати», а з іншого боку, у факті того, що тріщини в залізобетоні далеко не завжди є згубними. Невипадково друга група граничних станів позиціонується не більше як «придатність до нормальній експлуатації». Тим не менш, представлення залізобетонного середовища, що утримує тріщини, у вигляді дискретно-континуальної моделі створює додаткову інформаційну основу для побудови загальної теорії розрахунку і проектування залізобетонних конструкцій.

Перераховане, з урахуванням теми і спрямованості представленої дисертації, яка побудована в рамках сучасних підходів, дозволяє кваліфікувати її як **актуальну і придатну** для потреб теорії і практики залізобетонних конструктивних систем.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету у рамках наукових досліджень кафедри за держбюджетною темою № 6/10.01.02 «Новітні технології проектування залізобетонних конструкцій, що заводяться та експлуатуються в складних інженерно-геологічних умовах», а також № 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».

**Оцінка змісту дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 376 найменувань та двох додатків. Вона включає 423 сторінки, у тому числі 301 сторінка основного тексту, 109 ілюстрацій, містить 9 таблиць, 47 повних сторінок з рисунками та таблицями, 45 сторінок списку використаних джерел та 30 сторінок додатків. Вона побудована методологічно правильно та відповідає вимогам МОН України.

**У вступі** наведена інформація щодо актуальності роботи, позначені мета і задачі дослідження, викладена загальна характеристика, сформульовані ознаки наукової новизни і практичної значимості дисертації.

**В першому і другому розділах** дисертації наведено досить детальний аналіз досліджень (теоретичних і експериментальних) тріщиноутворення і тріщиностійкості залізобетонних конструкцій, при цьому, з позначенням недосліджених або недостатньо досліджених питань, що відносяться до проблеми, яка розглядається. Сучасно й репрезентативно виглядають розроблені структурно-логічні схеми, які інтегрують у собі весь перелік атрибутів, що мають бути вивчені, а також, що вказують на віртуальний напрямок ефективного використання механіки руйнування для опису (моделювання) процесу тріщиноутворення. Слід відмітити, що аналіз, який виконано є переконливим, в необхідних межах, нетенденційним і, поза сумнівом, виправдовує сформульовані й обґрунтовані задачі дослідження.

**Третій розділ** роботи є (у сенсі її логічної побудови) продовженням перших двох. Тут, окрім позначення традиційних гіпотез і допущень теорії залізобетонних конструкцій, представлений власні.

В їх основі лежить ідея використання для опису особливостей деформування білемента «бетон-арматура» моделі складеного стрижня О.Р. Ржаніцина. При цьому, постулюється небезсуперечлива можливість виникнення зосередженого зсуву на контакті складових білементу, що згадується. Тим не менш, доречним виглядає, і нажаль, що рідко розглядається, питання створення двомодульного залізобетонного елементу. Використання різних бетонів (не тільки при

реконструкції) вже має застосування у розвинених технологіях, хоча теоретичних основ цього процесу явно недостатньо (окрім, зрозуміло, представленої роботи). До позитивної сторони даного розділу слід також віднести розвиток підходу М.І. Карпенка, що відноситься до побудови класифікатора тріщин для одноосно і плоско навантажених конструкцій. Вважалася би більше повною й необхідною для практики класифікація тріщин, що враховує водонепроникність, морозостійкість, умови твердіння, старіння та інші характеристики бетону. Сюди ж можна віднести й врахування впливу різноманітних (що тепер широко застосовуються) добавок. Відмічається деяка некоректність оформлення: не позначена низка параметрів в формулах, у зв'язку з чим виникають питання про розмірність величин у виразах (2.3), (2.4), (2.9), (2.10), (2.11), (2.28). Що таке «нові ефекти опору бетону» - стор.80?

Нескромно, на наш погляд, виглядають фрази «світовий рівень», «загальнонаціональне значення»!? Не обумовлена наявність особливості в (2.37) при  $m_0=0$ . Яка послідовність побудови епюри напружень (рис. 3.3) по деформаціям, які замірювалися? Декілька є сумнівним термін «справжня причина» (стор. 128, 157). Позначення умовного модуля зсуву на сторінках 130 і 132 різні?! Абсолютно незрозуміло походження системи рівнянь (3.65) і позначення до неї! Невдало анонсування результатів, які будуть викладені у наступних розділах.

**Четвертий розділ** містить результати, що пов'язані з використанням ідеології механіки руйнування і які присвячені побудові нових двоконсольних елементів, які фундують моделі тріциноутворення (для складених одновісних і плосконапруженіх елементів) при різноманітних видах їх напруженодеформованого стану.

Власне розрахункові моделі, що описують деформування залізобетонних конструкцій, складені й обґрунтовані в **п'ятому розділі** дисертації. У зв'язку з чим, можна стверджувати, що саме ці розділи є домінантною складовою всієї роботи. Тут поряд з низкою цікавих результатів наведено ряд положень полемічного характеру. Зокрема, на сторінці 164 вказується, що бетон розглядається як анізотропний матеріал (вид анізотропії?), а підтвердження цьому факту у всіх викладках відсутнє. На сторінці 177 відмічено, що бетон в місці тріщини не є суцільним тілом, а – залізобетон?

Роботи, які цитовані (особливо ті, які містять результати експериментів), і що обґрунтують появу стрибків дотичних напружень і навіть зміни їх знаку в зоні, що примикає до тріщини, великою мірою утримують априорну інформацію, що потребує ретельної експериментальної верифікації.

Результатам власних експериментальним дослідженням присвячений **шостий розділ** дисертації. Можна відмітити значний об'єм робіт, які проведені і які направлені на послідовне тестування теоретичних положень, що прийняті і отримані в роботі. Відносно постановки і проведення експериментів є низка питань. І саме:

- як була обґрунтована кількість випробуваних зразків?
- в чому ексклюзивність експериментів з балками?
- як було проконтрольоване зварювання зміщеної арматури?
- як реалізоване завантаження «чистий зсув»?
- що моделювали пружини (рис. 6.16), і як вибиралася їх жорсткість, а також відстань між ними і як обґрунтувалася схема навантаження?
- як обґрунтувалася отримана ширина розкриття тріщин  $W > 0,2 \div 0,3$  мм (рис. 6.14, 6.15).

Чисельний аналіз, який виконаний на основі побудованих моделей, а також зіставлення теоретичних і експериментальних результатів містить в собі **сьомий розділ** дисертації. Допустимо відмітити об'єм, зміст та повноту представленої інформації, що включає аналіз введених параметрів і надійність порівнянь вивчених характеристик. До проблемних моментів тут можна віднести наступне:

- про який екстремум йде мова на сторінці 285?
- які коріння рівняння (стор.285) математично дійсні і фізично віправдані?
- яка розмірність другого доданку у формулі для відстані між тріщинами на стор.287?
- чим пояснюється розташування «оцінка знизу» - «оцінка зверху» пропонованої і нормативної методик (рис. 7.7÷7.17)?
- порівняння теоретичних результатів зроблено тільки для власних експериментів (табл. 7.27); чи має відношення вибір параметрів конструкції і система навантаження до теорії подоби і розмірностей;
- яке відношення має експоненційний закон деформування матеріалу до бетону і сталі (нелінійний розрахунок по «ЛПРА-САПР», стор. 332).

Тим не менш, можна відмітити, що отримані теоретичні результати, висновки та рекомендації науково обґрунтовані і базуються на основних положеннях механіки руйнування і сучасної теорії залізобетону. **Достовірність** більшості із них підтверджена рядом експериментів різних авторів (в том числі і своїми). Слід також вказати на той факт, що **вірогідність** отриманих результатів

підтверджена також значним порівняльним аналізом теоретичних і експериментальних даних з даними, що отримані зарубіжними і вітчизняними дослідниками для достатнього діапазону вивчення варійованих параметрів.

**Ступінь обґрунтованості** наукових положень роботи визначається значним обсягом зіставлень результатів, що отримані в її рамках з результатами, які декларуються іншими авторами на базі інших моделей. Остання обставина особливо важлива, оскільки **адекватність запропонованих моделей** підтримується їх допустимим кореспондуванням і ідеологією, що притаманні загальним уявленням про опір залізобетонних конструкцій.

#### **Наукову новизну роботи складають:**

- складена класифікація дискретних тріщин у стрижневих і плосконапруженых залізобетонних конструкціях, яка включає геометричну, силову, міжсередовищну концентрацію напружено-деформованого стану (НДС), а також систему дискретних суміжних тріщин, яка накладається на вже відому схему регулярних тріщин;
- запропоновані нові розрахункові схеми другого рівня для визначення утворення тріщин, ширини їхнього розкриття і багаторівневих відстаней між тріщинами;
- створена серія нових двоконсольних елементів (ДКЕ) наявності різних тріщин у залізобетонних конструкціях, у тому числі складених і плосконапруженых для різних видів опору: центральний розтяг (стиск), згин, позацентровий стиск, за наявністю багатоярусної арматури, з вільною орієнтацією арматурних стрижнів, у зоні похилих тріщин та універсальний ДКЕ, стосовно до складного опору, яка виконує роль трансформаційних елементів між адаптованими, стосовно до залізобетону, залежностями МР і залежностями теорії залізобетону, що дозволяють розробити нові моделі тріщиностійкості і жорсткості залізобетону;

– запропоновані нові розрахункові моделі залізобетонних конструкцій для визначення утворення тріщин, опору розтягнутого бетону між тріщинами у ЗБК (у тому числі складених), відстані між тріщинами і ширини розкриття тріщин, які базуються на більш тонкому інструментарії та основних положеннях МР, адаптованих стосовно до залізобетону для граничних станів другої групи із приведенням у відповідність розрахункових і експериментальних параметрів, які визначаються в тому числі за допомогою мікроскопа.

**Практична значимість отриманих результатів** полягає в тому, що запропоновані моделі деформування залізобетону на засадах механіки руйнування за рахунок найбільш повного врахування параметрів і особливостей деформування арматури і бетону дозволяють отримати більш достовірні рішення і виявити резерви для ефективного використання матеріалів. А також знайшла підтвердження:

- при розробці Державних будівельних норм ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво у сейсмічних районах України», ДСТУ Б.В.2.6-156:2010 «Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування»;
- при проектування залізобетонних конструкцій за тріщиностійкістю та деформативністю (жорсткістю) у проекті «Нове будівництво фізкультурно-оздоровчого центру на просп. Перемоги, 7-а у м. Луцьку», що призвело до зниження кількості робочої арматури на 3-7% на 1 м<sup>3</sup> залізобетону;
- при проектуванні та розрахунку залізобетонних конструкцій будівлі головного корпусу Центру для тимчасового утримання нелегальних мігрантів, який знаходиться в межах Прибужанської сільської ради Вознесенського району Миколаївської області, дозволило знизити кількість робочої арматурної сталі від 3 до 6% на 1 м<sup>3</sup> залізобетону у порівнянні з нормативною методикою, а також знизити витрати, пов’язані з антикорозійним захистом залізобетону;
- впроваджені в навчальний процес Національного авіаційного університету при вивченні дисциплін «Будівельні конструкції», «Залізобетонні та кам’яні конструкції», «Реконструкція будівель та споруд аеропортів» та ін.,

а також при виконанні дипломних проектів та магістерських робіт за спеціальністю 192 – «Будівництво та цивільна інженерія».

Усі принципові положення дисертації опубліковані у 62 наукових працях, у тому числі в 3 монографіях у співавторстві, 25 наукових статтях у фахових професійних виданнях, внесених до переліку ДАК України, 19 наукових статтях в іноземних спеціалізованих фахових виданнях (із них 14 Scopus та 2 у Web of Science), у 9 наукових працях за матеріалами міжнародних науково-практичних конференцій, 1 практичного посібника із розрахунку ЗБК, 2 нормативних документах України і 2 патентах України на корисну модель.

Автореферат відповідає дисертаційній роботі та розкриває її зміст. Він містить 44 сторінки, в тому числі 15 рисунків і 1 таблицю. Оформлення автореферату, аналогічно дисертації, відповідає вимогам МОН України.

#### **За змістом дисертації є зауваження:**

– в роботі, в певному сенсі, декларується відмова від гіпотези О. Коши і гіпотези плоских перетинів (щонайменше у рамках прийнятої моделі складаного стержня А.Р. Ржаніцина?!). У зв'язку з цим більш аргументованим був би перехід до експлуатації метода дискретних елементів, хоча двокомпонентне середовище (залізобетон) моделюється з достатнім ступенем точності (що доказано більшою кількістю експериментів) суцільним тілом. В якості аргументу на користь справедливості експлуатації гіпотези суцільних перетинів (нормалей) вважається доцільним процитувати положення з монографії І.І. Блехмана, А.Д. Мишкіса, Я.Г. Пановко «Прикладна математика: предмет, логіка, особливості підходів», а саме: «...як показала експериментальна перевірка, сама ця гіпотеза (Кірхгофа-Лява) виконується з невисокою точністю. Однак, точність важливих для інженерної практики наслідків з неї (значення деформацій, зусиль, критичних навантажень и т.п.) є прийнятною. Таким чином, модель, що заснована на цій гіпотезі виявляється адекватною відносно до вказаних властивостей». Підтвердження сказаному можна знайти також і у трактовці поняття «модель», що дана Н.Бейлі;

– як відмічається в монографії В.С. Шмуклера, Ю.А. Клімова, .П. Бурака «Каркасні системи полегшеного типу», розділ 5.4. «Найбільш впливає на величину граничних дотичних напружень  $\tau_c$ , та зчеплення арматури з бетоном у порівнянні з іншими факторами (міцністю, способом укладання, умовами

твірдіння, напруженим станом бетону та ін.) профіль поперечного перетину арматури», однак, у розгляданій роботі цьому фактору не приділено належної уваги;

– як показано у низці досліджень (у тому числі й опонента) тріщини й тріщиноподібні дефекти не є надзвичайною подією, тим більше в залізобетонних конструкціях. Це позначено і в нормативних документах. Аналіз аварій залізобетонних конструкцій також дозволяє враховувати справедливим це твердження. В свою чергу, результати, що приведені в дисертації (табл. 7.4, 7.5, 7.6, 7.7) і графіки 6.18 фактично підтверджують цей факт. У зв'язку з чим, вважалася б більш переконливою інформація про високу кореляцію процесу тріщиноутворення з деформованим станом залізобетонних конструкцій;

– в доповнення до попереднього пункту зауважень слід відмітити відсутність в роботі деяких аргументів, що допускають ігнорування стохастичності властивостей бетону, що зумовлюють, в свою чергу, стохастичність появ і розташування тріщин;

– міркування, що приведені на сторінках 129, 130, а також на рисунку 3.4 з одного боку, підтверджують неоднорідні властивості розгляданого середовища (дотичні напруження в зоні частого вигину?!), що доповнює викладене вище, а з іншого боку викликають подив, оскільки прослизання арматури в бетоні позначає кінець розуміння «залізобетон»;

– якщо доповнити викладене, враховувався б репрезентативним аналіз процесу утворення й розвитку тріщин, побудований на підставі критерія Я.Б. Фрідмана. Тим більше, в роботі постулюється можливість зміни знаку нормальніх напружень (відображення дуалізму «зрізання – відрив»);

– а не було би більш ефективним формування умов і технологій, які мінімізують тріщиноутворення, що є більш сучасним?;

– в роботі відсутня детальна інформація про процедуру визначення жорсткостей (формули, алгоритми). Окрім того, ймовірно, автором, за замовчуванням, розглядається аспект, що породжує віртуальну диференціацію жорсткостей?! Як це поєднується з основними положеннями механіки руйнування? І, зокрема, як відмічає Дж. Гордон «До недавнього часу в теорії пружності і пов'язаних з нею дослідженнях користувалися термінами

напруження, деформація, міцність і жорсткість, тобто, по суті можна сказати, поняттями сил і переміщень. ... Однак, чим більше спостерігаєш закономірності природи і міркуєш про техніку, тим більше схиляєшся до енергетичної концепції. Такий підхід дозволяє пояснити дуже багато і він лежить в основі сучасних моделей міцності матеріалів і поведінки конструкцій, тобто в основі досить модної науки – механіки руйнування. Непереконливо виглядають міркування (стор.43) про можливий розрив функції жорсткості;

– в роботі, знов таки за замовчуванням, приймається діаграма деформування бетону, що має «ниспадаочу гілку». А як в такому випадку враховується віртуальний поліморфізмграничних станів (стор. 125, рис. 3.1€, 3.2д). Як наслідок, не розкритий механізм перерозподілу зусиль з поясненням розуміння «шарнір пластичності». Як позначені особливості деформування встановлювалися в проведених експериментах?

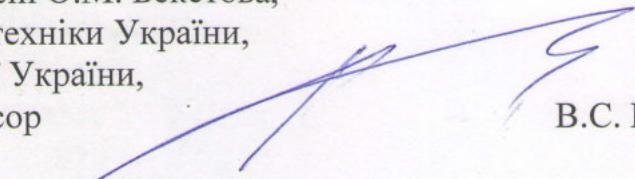
- в дисертації відсутній розгляд реологічного аспекту проблеми;
- при викладені задачі безумовної оптимізації (за рахунок введення множників Лагранжа) відсутнє її конкретне формулювання: запис розгорнутого функціоналу, обмежень (ОДР), методу рішення, чисельних результатів;
- вважалася би доцільним розгляд процесу тріциноутворення при динамічних навантаженнях. В цьому випадку, запропонований підхід був, на наш погляд, найбільш переконливим.

**Загальний висновок:** Враховуючи обсяг і різноманіття розглянутих проблем, значну широту охоплення загальнотеоретичних і локальних завдань, реалізований комплекс досліджень, немає нічого дивного в кількості питань, поставлених опонентом. Насамперед (і це природно для докторських дисертацій), важливо що згадані питання, в більшій своїй частині, носять виключно дискусійний характер і можуть бути приводом для подальшого розвитку розглянутих проблем. У зв'язку з чим, вважається репрезентативним наступне: *Дисертація є завершеною науковою роботою і відповідає вимогам п.п.9,10,12 «Порядку присудження наукових ступенів та присвоєння вченого звання старшого наукового робітника», затвердженого Постановою кабінету Міністрів України від 24.07.2013р. №567 до докторських дисертацій, містить*

нові науково обґрунтовані результати та вирішує важливу науково-технічну проблему розвитку теорії тріщиностійкості, жорсткості стрижневих і плосконапруженых залізобетонних конструкцій та побудову їх моделей деформування шляхом розробки трансформаційних двоконсольних елементів залізобетону, на основі синтезу гіпотез механіки твердого деформованого 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 та споруд із залізобетону, а її автор – Яковенко Ігор Анатолійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди.

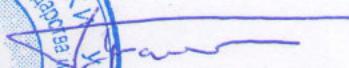
Офіційний опонент,

Завідувач кафедри будівельних конструкцій  
Харківського національного університету  
міського господарства імені О.М. Бекетова,  
Заслужений діяч науки і техніки України,  
лауреат Державної премії України,  
доктор техн. наук, професор

  
В.С. Шмуклер

Підпис професора В.С. Шмуклера засвідчує:

Вчений секретар  
ХНУМГ ім. О.Н.Бекетова  
доктор технічних наук, доцент

  
Д.В. Тугай

