

ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ БЕТОНІВ З ПОЗИЦІЇ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ (ОГЛЯД)

Львівський національний університет природокористування

У даній роботі представлені узагальнені результати аналізу і синтезу науково-технічних джерел з дослідження важких бетонів на засадах механіки руйнування за останні 25-30 років. Описано і узагальнено нові критерії і моделі для важких бетонів, які одержані за цей період, зокрема, нова деформаційна модель тріщиностійкості бетону на засадах механіки руйнування. Також представлено аналіз результатів експериментальних і теоретичних досліджень тріщиностійкості важких бетонів на дископодібних зразках при позацентровому розтягу зосередженими силами. Зокрема, розроблена методика експериментального визначення при статичних навантаженнях характеристик тріщиностійкості бетону, методика визначення довжини зони передруйнування у тріщині, зв'язку між механічними характеристиками важких бетонів і параметрами вимірювання акустичної емісії. Також розроблена методика та виконані дослідження тріщиностійкості бетонів з додавкою базальтового волокна і на натурних випробуваннях вивчено вплив базальтового волокна на тріщиностійкість та розкриття тріщин. Представлено узагальнені висновки. Зокрема констатовано, про значний розвиток за останні три десятиліття методів визначення міцності, тріщиностійкості і деформацій бетону у залізобетонних елементах з позицій механіки залізобетону та механіки руйнування. Зроблено висновок про доцільність використання для бетону деформаційної моделі Леонова-Панасюка та перспективність моделі фіктивної тріщини. На підставі узагальнених даних наведених у вказаних публікаціях відпрацьована методика технічної діагностики та методика ремонтно-відновлювальних робіт при посиленні з використанням сучасних технологій та матеріалів, що дає можливість значно збільшити ресурс і надійність залізобетонних будівель і споруд.

Ключові слова: бетон, критерії, моделі, руйнування, тріщиностійкість, довговічність.

Вступ

Будівельні конструкційні матеріали переважно схильні до крихкого руйнування, тобто до руйнування через розповсюдження дефектів типу тріщин. Процес руйнування у таких матеріалах не проходить миттєво, зокрема в бетоні. Від моменту утворення тріщин і до початку її критичного росту минає певний час. Як свідчить практика, під час експлуатації будівель і промислових споруд часто трапляються випадки, коли регламентовані умови роботи споруди (будинку) порушуються внаслідок просадки ґрунтів та інших чинників. Вони можуть змінювати робочу схему споруди, викликати додаткові навантаження, що може супроводжуватись додатковим збільшенням напружень в елементах та появою і ростом тріщин. Для запобігання аварійного стану бетонних конструкцій в таких випадках потрібна надійна методика оцінки придатності конструкції до подальшої експлуатації. Як відомо, така методика може бути створена на засадах механіки руйнування і механіки залізобетону. Підвищення економічності і надійності сучасного будівництва вимагає достатньо вивірених методик оцінки міцності і тріщиностійкості досліджуваних бетонних конструкцій з метою своєчасного визначення критичних ситуацій та запобігання руйнування. Тому важливою і актуальною науково-технічною проблемою стає розробка надійних методик визначення напружено-деформованого стану бетонних елементів конструкцій з тріщинами в експлуатаційній стадії, а також міцності і тріщиностійкості з позицій механіки руйнування та механіки залізобетону.

Основні результати

У роботі [1] виконано огляд праць з механіки руйнування бетону починаючи із 1920 р., коли вперше опублікована стаття Гріффітса «Явище руйнування і плину в твердих тілах» у якій запропоновано енергетичний критерій руйнування і тим самим започатковано механіку руйнування матеріалів. В цій статті виконано критичний аналіз і синтез наукових праць з механіки руйнування бетону як українських так і закордонних дослідників до 1991 року. З 1991 року і до 2022 року нагромадилось багато робіт в цьому напрямку, які і є предметом аналізу у даній роботі.

Розглянуто низку моментів, які стали актуальними на 90-ті роки минулого сторіччя про доцільність і можливість використання механіки руйнування для дослідження розвитку тріщин у бетоні, їх розкриття і розподілу мікротріщин у зоні передруйнування [2,3]. Зокрема, у роботі [2] на підставі аналізу науково-технічних джерел для дослідження розвитку тріщин в бетоні запропоновано використати математичну модель пружно-пластичної механіки руйнування Леонова-Панасюка δ_c . У моделі використано критерій Леонова-Панасюка - тріщина у бетоні починає розвиватися при умові, якщо розкриття її берегів у вершині досягає деякого критичного значення δ_c , яке є константою

матеріалу. Напруження в зоні псевдопластичних деформацій будемо вважати рівним f_{ctk} . Для моделювання руйнування при стохастичності розмірів і орієнтації заповнювачів використали концепцію критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{1c} . Для розрахунку розкриття у вершині тріщини використали метод еквівалентних напружених станів. Для визначення характеристик тріщиностійкості випробовували триточковим згином бетонні балочки з надрізами. Встановлено, що застосування методів пружно-пластичної механіки руйнування дає добру кореляцію розрахункових і експериментальних даних стосовно важких бетонів. В роботі [3] наголошено про деякі проблеми при оцінці параметрів механіки руйнування бетону, зокрема при великих розмірах заповнювачів, при порівняно великій зоні мікротріщин попереду реальної тріщини, що утруднює моделювання зони передруйнування.

У роботі [4] наведені загальні положення стандартизації методів з визначення характеристик тріщиностійкості бетонів під статичним навантаженням на засадах механіки руйнування. Приводяться стандартні типи і схеми навантаження зразків та їх геометричні розміри. Подані також аналітичні залежності для обробки результатів експериментальних даних, описані обладнання для випробування та процедура проведення експериментальних досліджень. Представлено визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань зразків з фіксуванням розмірів зростаючої магістральної тріщини і відповідних поточних значень прикладеного навантаження. Встановлені залежності для визначення міцності на розтяг бетону та його модуля пружності.

У роботі [5] на основі аналізу існуючих підходів запропонована методика визначення довжини зони передруйнування у бетонних елементах у будь-який момент навантаження. Підкреслено, що зона передруйнування попереду тріщини у бетонній балці співрозмірна з глибиною тріщини і розмірами перерізу. На основі розрахунків згідно запропонованої моделі автори формулюють висновок, що для бетонів величину зони передруйнування попереду тріщини в балках можна вважати пропорційною висоті перерізу перед тріщиною і приймати від 0,25 до 0,40 від цієї висоти.

У роботах [6,7] наведено результати комплексних досліджень, які були виконані у фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України під керівництвом к.т.н. с.н.с. Лучка Й. Й. Зокрема було підбрано оптимальні склади різних класів бетонів з добавкою грубого базальтового волокна. Відпрацьована методика дослідження фізико-механічних характеристик та параметрів тріщиностійкості механіки руйнування таких бетонів. Випробування виконувались на стандартних кубах, призмах і балочках з надрізами при точковому згині. Натурні випробування базальтозалізобетонних конструкцій показали: навантаження тріщиноутворення плит перекриття з добавкою базальтового волокна на 10–15 % більше, а розкриття тріщин при навантаженні $M/M_u=0,55$ на 10% менше ніж у плитах без добавки базальтового волокна. Значно менше тріщин виявилось і в сантехкабінах та вентиляційних блоках. Описані дослідження в роботі [6] послужили основою для узагальнення даних результатів у роботі [7]. Зокрема, у [7] наведена отримана для триточкового згину бетонного зразка залежність для визначення розкриття тріщини у її вершині на основі вимірювальної величини розкриття тріщини на поверхні зразка δ_n . Вимірювання δ_n здійснювали за допомогою двохконсольного датчика схема якого наведена у роботах [6, 7]. Запис діаграми $P-\delta_n$ виконували за допомогою двох координатних потенціометрів. Критичні значення K_{1c} , δ_c визначали в момент зрушення тріщини (руйнування) за наведеними формулами [6, 7].

У роботі [8] відзначено, що кінець тріщини визначити експериментально дуже важко із-за розсіяних мікротріщин у кінцевій зоні. Представлена та проаналізована характерна діаграма розкриття тріщини - навантаження (розвантаження) та вказані особливі її точки. На підставі експериментів проведених на балках з різною глибиною штучної тріщини (надрізу) одержана залежність відносного нахилу початкової ділянки діаграми розкриття, щодо відносної глибини тріщини з якої знаходимо відносну глибину тріщини λ . Наведено графіки цих залежностей та графіки зміни руйнуючої сили при зміні глибини тріщини для бетонних балок з цементного каменю, дрібнозернистого бетону та бетону з крупним заповнювачем. У висновках відзначено, що метод визначення глибини тріщини за критерієм розкриття тріщини і за падінням максимальної сили показує, що K_{1c} , δ_c залишаються постійними. Цей метод можна використовувати для визначення довжини зони передруйнування d , яку можна вважати пропорційною до висоти перерізу попереду тріщини і яка становить 0,25–0,40 від цієї висоти.

У роботах [9, 10, 11] наведені результати комплексних досліджень виконаних у фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України під керівництвом д.т.н. Й. Й. Лучка та к.т.н. П. М. Ковалю. Було проведено серію експериментів, для дослідження характеристик тріщиностійкості важких бетонів на засадах механіки руйнування та зв'язку характеристик тріщиностійкості з параметрами вимірювання акустичної емісії (АЕ) у таких бетонах. Зокрема, у роботі [9] описано п'ять серій експериментів для дослідження тріщиностійкості бетонів на дискових зразках при позацентровому

розтягу зосередженими силами. Наведено склад бетонних сумішей, класи бетонів на стиск, характеристики заповнювачів та цементу; також представлено результати дослідження механічних характеристик. Представлено розрахункову залежність за якою визначали міцність бетонів на розтяг f_{ctk} . Описано методику випробування дископодібних зразків. Представлена формула для визначення K_c . Наведено графік зміни навантаження та інтенсивності AE у момент утворення тріщини у бетонному зразку серії 5 на першому етапі «навантаження-розвантаження». Skorиставшись діаграмами «зусилля P – зміщення берегів тріщини V_i », побудованих за результатами експериментальних досліджень, визначали за поданою формулою розкриття δ_c у вершині тріщини. Наведено графік залежності δ_c від зміни f_{ctk} . Визначене K_c^{exp} отримано експериментально незалежно від K_c^{theor} . Підставивши у формулу γ^{exp} одержали теоретичне значення K_c^{theor} , і зробивши навпаки отримали γ^{theor} . У роботі [10] запропоновано експериментально-аналітичний підхід у рамках δ_c -моделі для коректного визначення параметрів механіки руйнування. Зокрема, силовий підхід базується на результатах розв'язку задачі про гранично-рівноважний стан зразка у вигляді диску із зовнішньою радіальною тріщиною, який навантажується розтягувальним зосередженим навантаженням. У результаті розв'язку цієї задачі отримано співвідношення для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} . Також наведена схема для визначення балансу енергії (роботи). Представлено характеристики п'яти серій дослідних бетонних зразків та результати їх експериментальних досліджень. Для всіх зразків записані діаграми руйнування для визначення експериментальної енергетичної характеристики тріщиностійкості γ^{exp} . Зокрема, визначивши ефективну поверхневу енергію γ стало можливим експериментально перевірити відоме співвідношення механіки руйнування $\sigma_0 \cdot \delta_c = 2\gamma$. За результатами досліджень сформульовані відповідні висновки. Також у роботі [11] представлена конструкція згаданих зразків, та наведені графіки відносних деформацій розтягу перед концентратором на ступенях навантаження зразків, які описані у роботі [9]. Представлено характер руйнування досліджуваних зразків, наведені у таблиці характеристик тріщиностійкості бетонів K_c^{exp} , γ^{exp} , δ_c^{exp} . Подано залежності зв'язку між K_c^{exp} і енергією $AE - SE_q$, що випромінюється під час старту тріщини, їх графічна інтерпретація та висновки.

У роботі [12] наведено основні принципи концепції безпеки складних технічних систем. Обмірковані загальні проблеми механіки катастроф. Підходи механіки руйнування поширені на аналіз безпеки та живучості технічних систем. Для обґрунтування допустимих станів інженерних конструкцій з тріщинами можуть бути використані коефіцієнти безпеки в уніфікованих рівняннях механіки руйнування. Підкреслимо, що аналізуючи безпеку та живучість, слід передовсім враховувати перехід тріщини з області допустимих станів в область катастрофічного (аварійного) руйнування інженерних конструкцій.

У праці [13] на основі нової фізичної моделі полікристала і закономірності оптико-механічної аномалії та принципу еквівалентності викладається основна кінематика кристалічного ковзання і приводяться визначальні закони міцності кам'яних матеріалів у рамках складного напруженого стану. Зокрема, сформульовані вихідні фізичні передумови прийнятої концепції ковзання, наведені окремі залежності та їх геометрична інтерпретація та схеми руйнування куба і призми при осьовому стиску. Представлено також порівняння результатів залежності отриманої для фізичного критерія розробленого на підставі оптико-механічної аналогії і принципу еквівалентності та руйнуюче навантаження σ_1 яке визначалось по критерію, яке наведено у таблиці [13].

У роботі [14] запропоновано деформаційну модель руйнування бетону, згідно з якою напружений стан у зоні передруйнування еквівалентний другій і третій ділянкам повної діаграми розтягу бетону (пластичного деформування і розпушення). У рамках моделі характеристиками матеріалу прийнято: критичне розкриття вістря тріщини, розкриття модельної тріщини на границі ділянок пластичного деформування та розпушення в зоні передруйнування, напруження зчеплення в модельній тріщині, довжини ділянок розпушення і пластичного деформування. Розглянуто розтяг безмежної площини з тріщиною у випадку пружно-пластичного моделювання.

Заслужують на увагу праці [15–18] у яких запропоновано моделі руйнування конструкційних матеріалів, їх аналіз та застосування. Зокрема у роботі [15] на підставі відомих квантових уявлень про будову матеріалу запропонована дискретна модель ДТТ. В цій моделі визначним структурним елементом кристалічного тіла, прийнята правильна тетрагональна біпіраміда в якій кут нахилу до основи визначається кутом ковзання. Для обґрунтування застосовані диференціальні рівняння електромагнетизму. Застосовано різні схеми перетворень врахування зміни матеріальної точки і її траєкторії при зростанні кута φ при рівномірному русі та використане афінне перетворення, в результаті отримано загальне рішення функціонала. В результаті цих досліджень зроблено висновок, що одержана закономірність для оцінки НДС кристалічних (полікристалічних) тіл як при об'ємному напруженому стані так і одновісному. У праці [16] наведено розрахунок сталезалізобетонної

конструкції в рамках мікрополяризованого середовища із застосуванням лінійної механіки руйнування. Представлено схеми руйнування бетонного куба і призми та наведено відповідні формули. Порівняння теоретичних і експериментальних даних коефіцієнта самозміцнення представлено у таблиці. У праці [17] наведено розв'язок задачі про зв'язок коефіцієнта Пуассона ν з кутом ковзання конструкційного матеріалу Φ – метрикою наноструктурного матеріалу (НСЕ) у формі тетрагональної біпіраміди. Оскільки хімічний зв'язок має електричну природу, то при зсуві НСЕ у процесі деформації вони поляризуються. Утворені при цьому електродиполі обертають НСЕ співвісно з напрямком дії осьової зовнішньої сили F , через що площини ковзання мають строгу орієнтацію. Одержані аналітичні результати підтверджені експериментальними даними незалежних дослідників. У праці [18] досліджено розкриття механізму утворення поперечних деформацій при осьовому стисненні (розтягу) конструкційного матеріалу. Звернута увага на сили взаємодії між НСЕ, які мають електричну природу (сили Ван-дер-Ваальса), і завдяки чому НСЕ здатні у процесі деформування набувати дипольний момент.

На підставі критеріїв і моделей механіки руйнування у роботах [19–22] наведено якісний і кількісний аналіз крихкого руйнування бетонів та застосування критеріїв і моделей для оцінки міцності бетонних конструкцій, аспекти теорії ковзання та розглянуто можливості застосування лінійної і нелінійної механіки руйнування до руйнування бетонів у конструкціях. Зокрема у роботі [19] стисло розглянуто викладені фізичні основи механіки мікрополяризованого середовища (МПС). У рамках механіки руйнування МПС проведено якісний і кількісний аналіз квазікрихкого руйнування стиснутих геометрично і фізично подібних бетонних зразків різної висоти. На підставі принципу автомодельності розглянуті умови переносу силових критеріїв з модельних зразків на геометрично і фізично подібні елементи великомасштабних сталобетонних конструкцій. Наведена схема руйнування геометрично і фізично подібних куба і призми та порівняння даних О.Я. Берга і автора у табличній формі. Представлена також схема руйнування бетонних призми, армованих сталевими пластинами поперек і поздовжньою стержневою арматурою при осьовому стиску, порівняння яких наведені у табличній формі. Зокрема у роботі [20] зроблена спроба узагальнити процеси фізичної поведінки бетону при стиску в умовах простого навантаження, прийнявши у якості механізму деформування – ковзання, а у якості механізму руйнування – відрив зі зміщенням за рахунок внутрішнього тертя вздовж площин ковзання. При експериментальних дослідженнях застосували енергетичний контурний J інтеграл Райса-Черепанова. Представлена схема руйнування при осьовому стиску куба і призми та схема роботи бетону в умовах обойми при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ і розрахункові формули. Представлено також порівняння експериментальних даних з теоретичними. А у роботі [21] в рамках теорії ковзання МПС, розробленої автором, і нормативних документів (ДБН В.2.6-98:2009, СНиП 2.03.01-84*, СП 52-101-2003) розглянуті співвідношення фізико-механічних характеристик важкого бетону класів С20...С60 з метою аналітичного визначення кута ковзання Φ і міцності бетону на розтяг. У результаті розрахунку значення міцність на розтяг збіглася з нормативними (f_{ctk}) для семи класів, а для класів С40 і С50 розбіжність склала, у кількісному вимірі 0,05 МПа, а у відсотковому – 2 %. З огляду на змішаний характер руйнування бетону, зроблена спроба визначення опору зрізу для бетону середньої міцності, як добутку $f_{ctk} \cdot \tan \Phi$. Результати розрахунків практично збіглися з результатами досліджень В.А.Бушкова та В.Я.Рутгерса. Зокрема у [22] виконано ґрунтовний аналіз робіт багатьох дослідників, які займалися дослідженнями конструкційних важких бетонів, зокрема, проблемами використання K_{1c} – критерія лінійної механіки руйнування, а також критеріями нелінійної механіки руйнування G_{1c} , J_{1c} , δ_{1c} та зв'язком між цими критеріями. Сформульовані основні проблеми і висновки.

Отже, підсумовуючи результати аналізу дослідження тріщиностійкості бетонів з позиції механіки руйнування на думку авторів можна відзначити доцільність застосування для оцінки міцності конструкційних бетонів деформаційних моделей (рис. 1).

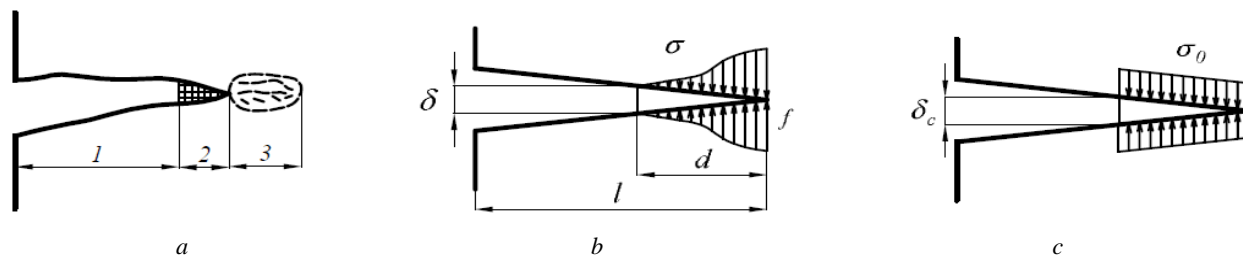


Рисунок 1 – Моделювання тріщини у бетоні: *a* – зони тріщини (*l* – ділянка вільна від зусиль зчеплення берегів тріщини; *2* – ділянка зчеплення за рахунок заповнювачів; *3* – зона мікророзтріскування); *b* – модель фіктивної тріщини Хіллерборга (*d* – зона непружної взаємодії, σ – нормальні напруження зчеплення, *f* – міцність на розрив); *c* – модель Леонова-Панасюка.

На рис. 2, а показано уточнення моделювання зони передруйнування та його обґрунтування при розтягненні безмежної пластини з тріщиною (рис.2,b) у випадку пружнопластичного моделювання [14]. У цій роботі на основі аналізу повної діаграми руйнування бетону запропоновані варіанти моделювання кінцевої зони тріщини і знаходження параметрів моделювання зони передруйнування. Виконано порівняння результатів визначення δ_{cl} та експериментальних даних наведених у роботі [23] і представлених у таблиці 1.

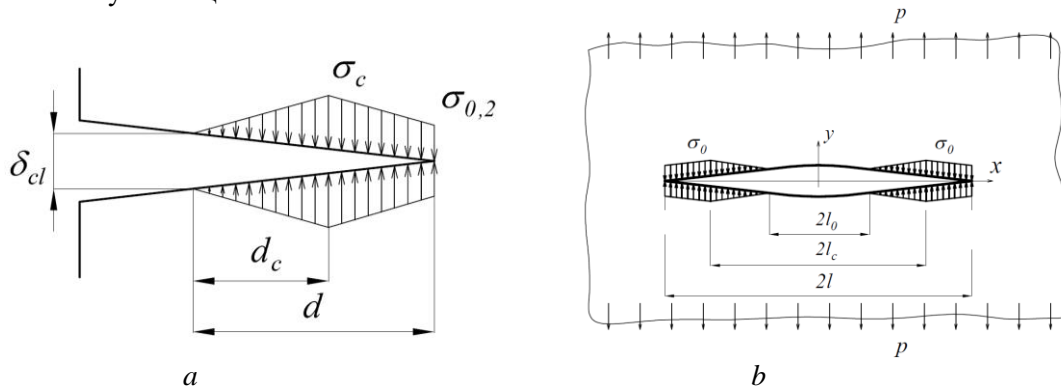


Рисунок 2 – Деформаційна модель руйнування бетону [14] та її апробація:

a – моделювання зони передруйнування; *b* – розтяг безмежної пластини з тріщиною у випадку пружно-пластичного моделювання

Таблиця 1

Експериментальне [23] та розрахункове δ_{cl}

f_{ctk} , МПа	$E_c \cdot 10^4$, МПа	ν	K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$	$\delta_{cl} \cdot 10^{-6}$, м
4,65	3,04	0,2	0,900	<u>15,80</u> 16,50
2,00	2,33	0,2	0,545	<u>18,10</u> 18,34
2,02	2,31	0,2	0,684	<u>22,00</u> 29,00
1,50	2,14	0,2	0,531	<u>26,80</u> 26,40
3,90	2,80	0,2	1,440	<u>50,00</u> 54,60
3,83	2,80	0,2	1,220	<u>56,00</u> 54,00
3,96	2,80	0,2	1,425	<u>54,00</u> 52,70

Примітка: У таблиці 1 над рискою наведено експериментальні дані [23], під рискою – розрахункові за поданою вище формулою.

Теоретичне значення критичного розкриття тріщини δ_{cl} визначаємо за формулою отриманою в рамках тристадійної моделі [14]:

$$\delta_{cl} = 3\pi CK_{1c}^2 / \sigma_0$$

де $\sigma_0 = (\sigma_c + \sigma_{0,2})/2$; C – константа, для узагальненого плоского напруженого стану $C = 1/\pi E$, для плоскої деформації $C = (1 - \nu^2)/\pi E$, де ν – коефіцієнт Пуассона.

Висновки

На підставі критичного аналізу і синтезу науково-технічних джерел та багатьох натурних і модельних випробувань будівельних матеріалів та конструкцій можна сформулювати наступні висновки:

1. За останні три десятиліття отримали значний поступ розглянуті основні методи визначення міцності, тріщиностійкості і деформацій бетону у залізобетонних балкових конструкціях з позицій механіки залізобетону і механіки руйнування бетону. Проаналізовані їх переваги і недоліки, зроблено висновок про доцільність використання деформаційних моделей, зокрема, δ_c – моделі

Леонова-Панасюка та її модифікацій.

2. Заслужують на увагу комплексні дослідження бетонних дископодібних зразків на позацентровий розтяг виконані у Фізико-механічному інституті НАН України у результаті яких напрацьована методика експериментальних досліджень, одержані експериментальні значення силової K_{1c}^{exp} , енергетичної γ^{exp} та деформаційної δ_c^{exp} характеристик тріщиностійкості для різних бетонів, проаналізовано ефективність їх застосування, експериментально досліджено залежність між накопиченням енергії акустичних сигналів SE_q , максимальним випробувальним навантаженням та коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{1c} .
3. Для дослідження розвитку тріщин у бетоні та залізобетонних елементах доцільно використовувати деформаційну модель руйнування бетону, згідно якої напружений стан в зоні передруйнування еквівалентний другій і третій ділянці повної діаграми розтягу (пластичного деформування і розпушення) [14].
4. Застосування механіки руйнування до розрахунку армованих бетонних конструкцій вимагає подальших експериментальних та теоретичних досліджень. На підставі аналізу та узагальнення даних наведених у вказаних публікаціях відпрацьовується методика технічної діагностики та ремонтно-відновлювальних робіт [24 – 25].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лучко И. И. Механика разрушения бетона (обзор) / И. И. Лучко // ФХММ. – 1991. – № 3. – С. 97 – 110.
2. Лучко Й. Й. Дослідження розвитку тріщин у бетоні та залізобетоні методами механіки руйнування / Й. Й. Лучко, Т.В.Гембара, Р.І.Квіт // Тези доповідей I Міжнародного симпозиуму українських інженерів-механіків. – Львів, 1993. – С. 50 – 51.
3. Лучко Й. Й. Застосування механіки руйнування до бетону та визначення розкриття тріщин із врахуванням стохастичного розподілу мікротріщин в зоні передруйнування / Й. Й. Лучко, Т. В. Гембара // Матеріали 2 -го міжнародного симпозиуму «Механіка і фізика руйнування матеріалів». – Львів, 1996. – С.76 – 80
4. Лучко Й. Й. Методичні рекомендації по визначенню характеристик тріщиностійкості бетонів під статичним навантаженням / Розроб. Й. Й. Лучко, В. В. Панасюк, О. С. Андрейків, С. С. Ковчик // ФМІ НАН України, Львів. – 1997. – 36 с.
5. Лучко Й. Й. Визначення довжини зони передруйнування в бетонних та залізобетонних балкових елементах конструкцій / Й. Й. Лучко, В. Ф. Лазар // Зб. наук. праць. Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. –Львів: Каменярь, 1998. – Вип.3. – С. 132 – 138.
6. Отчет по теме: «Исследование, разработка и освоение выпуска железобетонных конструкций с применением базальтового волокна и шлаков в условиях сейсмического строительства». – Львов: ФМИ имени Г. В. Карпенко АН УССР, 1989. – 85 с.
7. Luchko J. J. Determination of calculated parameters of concrete dispersive reinforced by basalt fiber / J. J. Luchko, V. V. Panasyuk, O. Ye. Andreykiv // In proceeding of 6th international conference "Modern building materials, structures and techniques". – Vilnius, Lithuania, 1999. – P. 86 – 88.
8. Лучко Й. Й. Експериментальний метод визначення довжини зони непружних деформацій / Й. Й. Лучко, В. Ф. Лазар // Вісник ЛДАУ. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – Львів, 2000. – № 1. – С. 153 – 158
9. Штаюра С.Т. Методика та експериментальні дослідження тріщиностійкості бетонів/С.Т. Штаюра, П.М. Сташук, М.Л. Дем'ян// Зб. наук.праць. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів та будівельних конструкцій.-Львів: «Каменярь», 2001. – Вип.3. – С.201–209
10. Лучко Й. Й. Порівняння силового та енергетичного підходів під час визначення характеристик тріщиностійкості бетону / Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, С.Т. Штаюра // Зб. наук. праць. Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів: Каменярь, 2002. – Вип. 5. – С. 241 – 248.
11. Коваль П. М. Дослідження зв'язку між характеристиками тріщиностійкості і параметрами вимірювання акустичної емісії у важких бетонах / П. М. Коваль, Й. Й. Лучко, А. М. Сташук // Зб. наук. праць. Діагностика довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів: Каменярь, 2004. – Вип. 6. – С. 48 – 52
12. Махутов Н.А. Подходы механики разрушения в концепции инженерной безопасности / Н.А. Махутов, Ю.Г. Матвиенко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів: ФМІ ім. Г.В Карпенка, 1996. – Вип.2. – С.35–42.
13. Рудаков В.Н. Физический критерий прочности квазиизотропного поликристаллического материала / В.Н. Рудаков // Зб. наук. праць. Будівельні конструкції. НДІБК. – Київ , 2003. – Книга 1. – Вип. 59. – С.216–225.
14. Панасюк В. В. Деформаційна модель руйнування бетону / В. В. Панасюк, Й. Й. Лучко, І. М. Панько // Міжнарод. наук.-тех. журнал Проблеми міцності. – Київ, Україна, 2003. – № 2. – С. 18–28.
15. Рудаков В.Н. О механизме деформирования кристаллического (поликристаллического) квазиизотропного тела в рамках атомистического мировоззрения / В.Н. Рудаков // Зб. наук. праць. Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. За загальною ред. Й.Й. Лучка: - Львів : - Каменярь , 2005. – Вип. 6. – С.127–139.
16. Рудаков В.Н. О принципе самоупрочнения при осевом сжатии безинерционной нагрузкой стандартной бетонной призмы по мере снижения высоты / В.Н. Рудаков, Д.В. Абрамитов // Зб.наук.праць. Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. За загальною ред. Й.Й. Лучка: – Львів : - Каменярь , 2009. – Вип. 8. – С.245–259.
17. Рудаков В.Н. Об эффекте реализации физических свойств наноструктурных материалов при проектировании несущих элементов универсального назначения / В.Н. Рудаков, Д.В. Абрамитов, А.Ю Мельник // Зб.наук.праць Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. За загальною ред. Й.Й. Лучка. - Львів . – Каменярь , 2014. – Вип. 10. – С.204–215.
18. Рудаков В.Н. Пирамида Хеопса–макромодель структурной наночастицы конструкционного материала / В.Н. Рудаков, Д.

- В. Абракітов, А.Ю. Мельник // 36.наук.праць Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. За загальною ред. Й.Й. Лучка. – Львів. – Каменярь, 2014. – Вип. 10. – С.216–226.
19. Рудаков В.Н. Некоторые физические аспекты механики разрушения сжатых бетонных и сталебетонных конструкций / В.Н. Рудаков // Вісник ОДАБА. – Одеса: місто майстрів, 2006. – Вип. 23. – С. 273–285.
 20. Рудаков В.Н. К применению энергетического критерия Райса-Черепанова для оценки прочности сталебетонных конструкций / В.Н. Рудаков, Рахим Саран, И.А. Староженко // 36.наук.праць Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. За загальною ред. Й.Й. Лучка. – Львів. – Каменярь, 2005. – Вип. 6. – С.120–126.
 21. Рудаков В. Н. Нанотехнологические аспекты оценки нормативных физико-механических характеристик конструкционного бетона в рамках теории скольжения микрополяризованной среды (МПС) при доверительной вероятности $V_{bkn} = (1-1,64 \times 0,135 \times 0,01 bi)$ / В. Н. Рудаков, Г. А. Молодченко, Д. В. Абракітов // Вестник ДНУЖТ им. ак. В. Лазаряна. Наука и прогресс транспорта, 2011. – Вип.39. – С.180–190.
 22. Лучко Й. Й. Критерії лінійної і нелінійної механіки руйнування бетону. 36.наук.праць. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів: Каменярь, 2005. – Вип. 7. – С. 104 – 120.
 23. Лучко Й. Й. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування: [Монографія] / Й. Й. Лучко, В. М. Чубріков, В. Ф. Лазар // НАН України, ФМІ ім. Г. В. Карпенка. – Львів: Каменярь, 1999. – 348 с. ISBN 5-7745-0753-10.
 24. Панасюк В. В. Оцінка ресурсу конструкцій мостів / В. В. Панасюк, Й. Й. Лучко, П. М. Коваль // 36.наук.праць. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів: Каменярь, 2002. – Вип. 4. – С. 145 – 154.
 25. Лучко Й.Й. Дослідження збудованих мостів які були зруйновані повеннями на Україні у 1998 і 2001 роках та тривалої експлуатації / Й.Й.Лучко, І.І.Кархут, І.Б.Кравець // 36.наук.праць Мости і тунелі : Терія, дослідження, практика. –Дніпро, 2021. – вип.20.- с.26-38.

REFERENCES

1. Luchko Y. Y. Mekhanyka razrusheniya betona (obzor) / Y. Y. Luchko // FKHM. – 1991. – № 3. –S. 97 – 110.
2. Luchko Y. Y. Doslidzhennia rozvytku trishchyn u betoni ta zalizobetonni metodamy mekhaniky ruinuвання / Y. Y. Luchko, T.V.Hembara, R.I.Kvit // Tezy dopovidei I Mizhnarodnoho sympoziumu ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv. – Lviv, 1993. – S. 50 – 51.
3. Luchko Y. Y. Zastosuvannia mekhaniky ruinuвання do betonu ta vyznachennia rozkryttia trishchyn iz vrakhuvanniam stokhastychnoho rozpodilu mikrotrishchyn v zoni pered ruinuвання / Y. Y. Luchko, T. V. Hembara // Materialy 2 -ho mizhnarodnoho sympoziumu «Mekhanika i fizyka ruinuвання materialiv». – Lviv, 1996. – S.76 – 80
4. Luchko Y. Y. Metodychni rekomendatsii po vyznachenni kharakterystyk trishchynostiikosti betoniv pid statychnym navantazhenniam / Rozrob. Y. Y. Luchko, V. V. Panasiuk, O. Ye. Andreikiv, S. Ye. Kovchuk // FMI NAN Ukrainy, Lviv. – 1997. – 36 s.
5. Luchko Y. Y. Vyznachennia dovzhyny zony peredruinuвання v betonnykh ta zalizobetonnykh balkovykh elementakh konstruksii / Y. Y. Luchko, V. F. Lazar // Zb. nauk. prats. Mekhanika i fizyka ruinuвання budivelnykh materialiv i konstruksii. –Lviv: Kameniar, 1998. – Vyp.3. – S. 132 – 138.
6. Otchet po teme: «Issledovanie, razrabotka i osvoenie vipuska zhelezobetonnykh konstruksii s primeneniem bazaltovogo volokna i shlakov v usloviyakh seismicheskogo stroitelstva». – Lvov: FMI imeni G. V. Karpenko AN USSR, 1989. – 85 s.
7. Luchko J. J. Determination of calculated parameters of concrete dispersive reinforced by basalt fiber / J. J. Luchko, V. V. Panasyuk, O. Ye. Andreykiv // In proceeding of 6th international conference "Modern building materials, structures and techniques". – Vilnius, Lithuania, 1999. – P. 86 – 88.
8. Luchko Y. Y. Eksperymentalnyi metod vyznachennia dovzhyny zony nepruzhnykh deformatsii / Y. Y. Luchko, V. F. Lazar // Visnyk LDAU. Arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo. – Lviv, 2000. – № 1. – S. 153 – 158
9. Shtaiura S.T. Metodyka ta eksperymentalni doslidzhennia trishchynostiikosti betoniv/C.T. Shtaiura, P.M. Stashuk, M.L. Demian// Zb. nauk.prats. Diahnostyka, dovhovichnist ta rekonstruksiia mostiv ta budivelnykh konstruksii.-Lviv: «Kameniar», 2001.- Vyp.3.-s.201-209
10. Luchko Y. Y. Porivniannia sylovoho ta enerhetychnoho pidkhodiv pid chas vyznachennia kharakterystyk trishchynostiikosti betonu / Y. Y. Luchko, P. M. Koval, S. Shtaiura // Zb. nauk. prats. Mekhanika i fizyka ruinuвання budivelnykh materialiv ta konstruksii. – Lviv: Kameniar, 2002. – Vyp. 5. – S. 241 – 248.
11. Koval P. M. Doslidzhennia zviazku mizh kharakterystykamy trishchynostiikosti i parametry vymiriuvannia akustychnoi emisii u vazhkykh betonakh / P. M. Koval, Y. Y. Luchko, A. M. Stashchuk // Zb. nauk. prats. Diahnostyka dovhovichnist ta rekonstruksiia mostiv i budivelnykh konstruksii. – Lviv: Kameniar, 2004. – Vyp. 6. – S. 48 – 52
12. Makhutov N.A. Podkhodi mekhaniki razrusheniya v kontseptsii inzhenernoi bezopasnosti / N.A. Makhutov, Yu.G. Matvienko // Fiziko-khimichna mekhanika materialiv. – Lviv: FMU im. G.V Karpenka, 1996. – Vip.2. – S.35-42.
13. Rudakov V.N. Fizicheskii kriterii prochnosti kvaziizotropnogo polikristalicheskogo materiala / V.N. Rudakov // Zb. nauk. prats. Budivelni konstruksii. NDIBK. – Kiřv, 2003. – Kniga 1. – Vip. 59. – S.216-225.
14. Panasiuk V. V. Deformatsiina model ruinuвання betonu / V. V. Panasiuk, Y. Y. Luchko, I. M. Panko // Mizhnarod. nauk.-tekh. zhurnal. Problemy mitsnosti. – Kyiv, Ukraina, 2003. – № 2. – S. 18-28.
15. Rudakov V.N. O mekhanizme deformirovaniya kristalicheskogo (polukristalicheskogo) kvaziizotropnogo tela v ramkakh atomisticheskogo mirovozhreniya / V.N. Rudakov // Zb. nauk. prats. Mekhanika i fizyka ruinuвання budivelnykh materialiv ta konstruksii. Za zagalnoyu red. Y.I. Luchka: - Lviv : - Kamenyar , 2005. – Vip. 6. – S.127-139.
16. Rudakov V.N. O pritsipe samouprochneniya pri osevom szhatii bezinertsionnoi nagruzkoj standartnoi betonnoi prizmi po mere snizheniya visoti / V.N. Rudakov, D.V. Abrakitov // Zb.nauk.prats Mekhanika i fizyka ruinuвання budivelnykh materialiv ta konstruksii. Za zagalnoyu red. Y.I. Luchka: - Lviv : - Kamenyar , 2009. – Vip. 8. – S.245-259.
17. Rudakov V.N. Ob effekte realizatsii fizicheskikh svoistv nanostrukturnykh materialov pri proektirovanii nesushchikh elementov universalnogo naznacheniya / V.N. Rudakov, D.V. Abrakitov, A.Yu Melnik // Zb.nauk.prats Mekhanika i fizyka ruinuвання budivelnykh materialiv ta konstruksii. Za zagalnoyu red. Y.I. Luchka: - Lviv : - Kamenyar , 2014. – Vip. 10. – S.204-215.

18. Rudakov V.N. Piramida Kheopsa–makromodel struktturnoi nanochastitsi konstruksionnogo materiala / V.N. Rudakov, D. V. Abrakitov, A.Yu. Melnik // Zb.nauk.prats Mekhanika i fizika ruinovannya budivelnykh materialiv ta konstruksii. Za zagalnoyu red. Y.I. Luchka: - Lviv : - Kamenyar , 2014. – Vip. 10. – S.216-226.
19. Rudakov V.N. Nekotore fizicheskie aspekty mekhaniki razrusheniya szhatikh betonnykh i stalebetonnykh konstruksii / V.N. Rudakov // Visnik ODABA. – Odesa: misto maistriv, 2006. – Vip. 23.- S. 273-285.
20. Rudakov V.N. K primeneniyu energeticheskogo kriteriya Raisa-Cherepanova dlya otsenki prochnosti stalebe-tonnykh konstruksii / V.N. Rudakov, Rakhim Saran, I.A. Starozhenko // Zb.nauk.prats Mekhanika i fizika ruinovannya budivelnykh materialiv ta konstruksii. Za zagalnoyu red. Y.I. Luchka: - Lviv : - Kamenyar , 2005. – Vip. 6. – S.120-126.
21. Rudakov V. N., G. A. Molodchenko, D. V. Abrakitov. Nanotekhnologicheskie aspekty otsenki normativnykh fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik konstruksionnogo betona v ramkakh teorii skolzheniya mikropolyarizovannoi sredi (MPS) pri doveritelnoi veroyatnosti $Vb_{kni} = (1-1,64 \times 0,135 \times 0,01)$ bi) Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsionalnogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta, 2011
22. Luchko Y. Y. Kryterii liniinoi i neliniinoi mekhaniky ruinovannya betonu. Zb.nauk.prats. Diahnostyka, dovhovichnist ta rekonstruksiiia mostiv i budivelnykh konstruksii. – Lviv: Kameniar, 2005. – Vyp. 7. – S. 104 – 120.
23. Luchko Y. Y. Mitsnist, trishchynostiikist i dovhovichnist betonnykh ta zalizobetonnykh konstruksii na zasadakh mekhaniky ruinovannya: [Monografii] / Y. Y. Luchko, V. M. Chubrikov, V. F. Lazar // NAN Ukrainy, FMI im. H. V. Karpenka. – Lviv: Kameniar, 1999. –348 s. ISBN 5-7745-0753-10.
24. Panasiuk V. V. Otsinka resursu konstruksii mostiv / V. V. Panasiuk, Y. Y. Luchko, P. M. Koval // Zb.nauk.prats Diahnostyka, dovhovichnist ta rekonstruksiiia mostiv i budivelnykh konstruksii. – Lviv: Kameniar, 2002. – Vyp. 4. – S. 145 – 154.
25. Luchko Y. Y. Doslidzhennia zbudovanykh mostiv yaki byly zruinovani poveniamy na Ukraini u 1998 i 2001 rokakh ta tryvaloi ekspluatatsii / Y. Y.Luchko, I.I.Karkhut, I.B.Kravets // Zb.nauk.prats. Mosty i tuneli : Teriia, doslidzhennia, praktyka. –Dnipro, 2021. – vyp.20.- s.26-38.

Лучко Йосип Йосипович – доктор технічних наук, професор. Кафедра будівельних конструкцій, Львівський національний університет природокористування, ORCID 0000-0002-3675-0503

Боднар Юрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент. Кафедра будівельних конструкцій, Львівський національний університет природокористування, ORCID 0000-0002-7196-2157

Y.Y. Luchko
Yu.I. Bodnar

CONCRETE CRACK RESISTANCE CONSIDERING DESTRUCTION MECHANICS (REVIEW)

Lviv National Environmental University.

This paper presents the generalized results of the analysis and synthesis of scientific and technical sources of investigation the heavy concrete on the basis of fracture mechanics for the last 25-30 years.

New criteria and models for heavy concrete, which were obtained during this period have been described and generalized, in particular, a new deformation model of concrete crack resistance on the basis of fracture mechanics. The analysis of results of experimental and theoretical researches of heavy concrete crack resistance on disk-shaped samples at eccentric stretching by concentrated forces has been presented. A number of methods have been elaborated i.e. a method for experimental determination of the concrete crack resistance characteristics under static loads, a method for determining the length of the fracture zone in the crack, the relationship between the mechanical characteristics of heavy concrete and the parameters of acoustic emission measurement. The method of concrete cracking resistance with the addition of basalt fiber was also developed and the influence of basalt fiber on crack resistance and crack opening was studied in field tests. The generalized results have been presented.

It has been stated about the significant development over the last three decades of methods for determining the strength, crack resistance and deformation of concrete in reinforced concrete elements from the standpoint of reinforced concrete mechanics and mechanics of concrete destruction. The conclusions about the expediency of using the Leonov-Panasyuk deformation model for concrete and the prospects for fictitious crack model have been made.

On the basis of the generalized data given in the specified publications the technique of technical diagnostics and a technique of repair and restoration works at strengthening with use of modern technologies and materials has been developed that gives the chance to increase considerably a resource and reliability of reinforced concrete buildings and constructions.

Key words: concrete, criteria, models, destruction, crack resistance, durability.

Luchko Yosyp Yosypovych – Doctor of Technical Sciences, Professor. Chair of Building Constructions. Lviv National Environmental University. ORCID 0000-0002-3675-0503

Bodnar Yiriy Ivanovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Building Constructions.. Lviv National Environmental University. ORCID 0000-0002-7196-2157