



Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2024-7>

УДК 539.3:620.012.624.21+624.19:625



ЛУЧКО Й.Й.

Доктор техн. наук, професор
кафедри будівельних конструкцій
Львівського національного університету природокористування,
м. Львів, Україна
e-mail: karkhoot1@gmail.com
тел.: +38 (097) 033 18 36
ORCID ID: 0000-0002-3675-0503

ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПОЗИЦІЙ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ

АНОТАЦІЯ

У даній роботі наведені результати аналізу і синтезу науково-технічних джерел та низки досліджень залізобетонних конструкцій, новозбудованих та тривалої експлуатації будівель і споруд. Узагальнені результати досліджень на засадах механіки руйнування залізобетонних конструкцій споруд, зокрема за останні 30 років, які наведені у монографіях і довідниках. Виконано аналіз окремих робіт, в яких наведені дані досліджень залізобетонних конструкцій будівель і споруд тривалої експлуатації та теоретичних досліджень з надійності і довговічності з оцінкою залишкового ресурсу. Детально проаналізовані основні теоретичні моделі тріщиноутворення, схеми випробовувань та оцінки результатів досліджень розвитку тріщин в залізобетонних конструкціях. Проаналізовані сучасні погляди на механіку руйнування залізобетону як крихкого матеріалу. Виконано оцінку застосованих методів теорії ймовірності та математичної статистики, зокрема прийомів і методів фізичного, технічного і математичного моделювання. У результаті проведених досліджень встановлені основні причи-

ни деградації конструкцій будівель і споруд та розроблена методика ремонтно-відновлюваних робіт таких конструкцій із визначенням залишкового ресурсу, які узагальнені у відповідних монографіях та довідниках. Встановлено, що основні причини зводяться до наступного: це помилки проектування, дефекти та недоліки будівництва і експлуатації. На підставі узагальнених та критично осмислених наведених науково-технічних джерел та низки досліджень відпрацьована методика технічної діагностики залізобетонних конструкцій та методика посилення з використанням сучасних технологій і матеріалів. Використання цих технологій і матеріалів дає можливість значно збільшити термін експлуатації і надійність вказаних конструкцій та зробити відповідні обґрунтовані висновки щодо відновлення їх залишкового ресурсу та забезпечення подальшої надійної експлуатації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: бетон, залізобетон, конструкції, критерії, моделі руйнування, деградація, корозія арматури, карбонізація бетону, тріщиностійкість, довговічність, ресурс.



CRACK RESISTANCE OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES FROM THE PERSPECTIVE OF FRACTURE MECHANICS

ABSTRACT

This work presents the results of the analysis and synthesis of scientific and technical sources, as well as a series of studies on reinforced concrete structures of newly constructed and long-operating buildings and facilities. The results of studies based on the principles of fracture mechanics of reinforced concrete structures, especially over the last 30 years, presented in monographs and reference books, are summarized. An analysis of individual works, which includes research data on reinforced concrete structures of buildings and facilities with prolonged use and theoretical research on reliability and durability with an assessment of residual life, has been conducted. The main theoretical models of crack formation, testing schemes, and assessment of research results on crack development in reinforced concrete structures have been thoroughly analyzed. Modern views on the fracture mechanics of reinforced concrete as a brittle material have been examined. An evaluation of the applied methods of probability theory and mathematical statistics, including techniques and methods of physical, technical, and mathematical modeling, has been performed. As a result of the research conducted, the main causes of degradation of construction structures and a methodology for repair and restoration works of such structures with determination of residual life were established and summarized in respective monographs and reference books. It was found that the main causes boil down to design errors, defects, and shortcomings in construction and operation. Based on the generalized and critically analyzed scientific-technical sources and a series of studies, a methodology for the technical diagnostics of reinforced concrete structures and a method of reinforcement using modern technologies and materials have been developed. The use of these technologies and materials allows significantly increasing the service life and reliability of the mentioned structures and making justified conclusions regarding the restoration of their residual life and ensuring further reliable operation.

KEYWORDS: concrete, reinforced concrete structures, fracture criteria and models, degradation, reinforcement corrosion, concrete carbonation, crack resistance, durability, resource

ВСТУП

Залізобетонні конструкції, які працюють тривалий період, потребують обстеження технічного стану та, за необхідності, ремонту і відновлення їх несучої здатності, і за певних умов обґрунтування подальшої експлуатації. Сьогодні недостатньо розвинуті методи аналізу і визначення залиш-

кового ресурсу будівель та інженерних споруд, що відпрацювали проектний ресурс роботи. У результаті тривалої експлуатації конструкцій у їх елементах накопичилися різні дефекти, відбулися деструктивні зміни бетону і арматури. З метою вивчення умов роботи конструкцій будівель і споруд, впливу на них вказаних факторів, їх періодично обстежують (досліджують) і при необхідності виконують постійний моніторинг за відповідальними елементами споруд. Тому питання, пов'язані з технічною діагностикою, розробкою сучасних методів відновлення несучої здатності і визначення залишкового ресурсу з позиції механіки руйнування та створення засобів відновлення елементів конструкцій будівель і споруд є дуже актуальними.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Механіка руйнування зародилась у 20-х роках 19 ст. з появою статті А. Гріффітса «Явище руйнування і текучості у твердих тілах», в якій отримано вперше математичний опис крихкого руйнування тіла з тріщиною. Зокрема, працюючи інженером в авіаційному дослідницькому центрі у Лондоні, Гріффітс дослідив, що існуюча тріщина одержує можливість лавиноподібно розповсюджуватись, як тільки інтенсивність звільнення енергії U перевищить інтенсивність поглинання енергії P . Це припущення і стало основою запропонованого Гріффітсом енергетичного критерію руйнування тіла з тріщиною, який записується так: $G > 2U_s$.

Як відомо, у переважній більшості залізобетонних конструкцій допускаються тріщини певного розкриття у експлуатаційній стадії. Тому, для опису напружено-деформованого стану (далі – НДС) дослідники почали займатися не тільки з позиції механіки залізобетону, але й з позиції механіки руйнування бетону і залізобетону. У 60 – 90-х роках з'явилося багато наукових робіт з дослідження міцності і тріщиностійкості бетону і залізобетонних конструкцій. В оглядови роботі [1] з механіки руйнування бетону підсумовані результати досліджень до 1991 року, а в роботі [2] – дослідження до 1995 р. з оцінки тріщиностійкості залізобетонних конструкцій.

За останні 30 років виконана значна кількість наукових досліджень, які описують деградацію бетонних та залізобетонних конструкцій будівель і споруд, зокрема впливи повітряного, ґрунтового і водного агресивних середовищ, результати яких опубліковані в багатьох роботах [3 ÷ 5].

МЕТА

Мета роботи: на основі аналізу і синтезу опублікованих науково-технічних джерел та монографій узагальнити дослідження з механіки руйнування бетонних і залізобетонних конструкцій та сформулювати результати в узагальнених висновках і рекомендаціях для прак-



тичного застосування, зокрема оцінки міцності і тріщиностійкості такого матеріалу і конструкцій.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ АНАЛІЗ

На сьогоднішня появилися серйозні дослідження, які узагальнені та опрацьовані в фундаментальних роботах, монографіях і довідниках [6÷19, 23 та ін.]. Нижче розглянемо монографії та довідники з механіки руйнування бетону і залізобетону.

У роботі [6] основна увага звернута на аналітичний опис процесу розвитку тріщини у мікро- і макроструктурі бетону у рамках механіки руйнування і його зв'язку з процесами деформування і руйнування матеріалу. Розглянуто низку практично важливих задач з прогнозування характеристик міцності, деформацій бетонів з врахуванням особливостей його структури та оптимізації деяких властивостей матеріалу. Зокрема, у цій роботі руйнування розглядається як поступова деградація структури бетону. Ця робота є першим узагальненням з механіки руйнування бетону на пострадянському просторі.

Робота [7] – це перша фундаментальна робота по температурній тріщиностійкості масивних бетонних споруд, яка присвячена застосуванню критеріїв механіки руйнування при дослідженні зародження тріщин, кінетики тріщин в масивних гідротехнічних спорудах, зокрема в греблях, а також температурного тріщиноутворення. Розроблена двопараметрична модель руйнування бетону з врахуванням структури і повзучості матеріалу. У даній роботі також описано другий варіант двопараметричної моделі, зокрема вказано, що перший варіант наближено дає верхню границю міцності на розтяг бетону, а другий – нижню границю, тому що на крихке руйнування матеріалу має обмежене застосування. Також у третьому варіанті розглянуто трипараметричну модель, яка дає задовільні результати при згині.

У роботі [8] описано міцнісні і деформаційні властивості бетону. Наведені основні положення механіки руйнування, де розглянуто задачі і експериментальні дані про тріщиностійкість бетону, моделі руйнування та оцінку масштабного фактору у бетоні при згині і розтягу. Представлені допоміжні задачі теорії пружності, які розв'язуються методом граничних інтегральних рівнянь, розклинювання пружної півплощини, функції впливу для напружень та нормальних переміщень. Розглянута стадія тріщиноутворення у залізобетонних балках, де наведено постановку задачі та одержано рівняння тріщиноутворення. Також описано розрахунок залізобетонних елементів у стадії експлуатації та сформульовані розрахункові рівняння для визначення напружено-деформованого стану елемента з односторонніми крайовими тріщинами при розтягу, вплив довготривалої дії навантаження на НДС залізобетонних елементів з тріщинами,

умови утворення поздовжніх тріщин та розрахунок залізобетонних елементів з урахуванням нелінійності деформування бетону і арматури. Відзначимо, що автор цієї роботи вперше системно застосував механіку руйнування для низки задач, зокрема для визначення НДС залізобетонних балкових конструкцій.

У роботі авторів [9] системно викладено основні поняття, методи і моделі лінійної і нелінійної механіки руйнування на рівні вимог відповідної програми університетів. Описано теорію втомних тріщин та акцентовано увагу на взаємозв'язок модельних уявлень з реальними процесами деформування і руйнування, які проходять на фронті тріщини, а також обмежені області застосування теоретичних моделей. Проаналізовані умови коректності експериментальних методів визначення характеристик тріщиностійкості і наведені відомості про найбільш вживані схеми випробувань.

У роботі [10] висвітлено питання зв'язку між параметрами бетонної конструкції та параметрами механіки руйнування, зокрема між коефіцієнтами інтенсивності напружень K_{Ic} та K_{2c} та роботу бетону руйнування J_{2c} . Випробування на в'язкість руйнування виконували з використанням моделі розтріскування II, а частина моделі була з використанням моделі K_{Ic} (розтягування при вигині). Контактний шар між заповнювачем і цементним розчином досліджували за допомогою скануючого мікроскопу. Стереологічні дослідження та переломи виконували за допомогою комп'ютерного аналізатора зображень. Також розглядаються принципи механіки руйнування, можливості їх застосування та описана методологія та обсяг досліджень.

Досліджено вплив типу, кількості та розміру зерен крупного заповнювача на K_{2c} і J_{2c} і їх зв'язок зі стереологічними параметрами. Також розглянуто вплив контактного шару на стійкість бетону до розтріскування K_{2c} і J_{2c} , зокрема і хімічно неактивного щодо цементного розчину. Вплив водоцементного відношення на в'язкість випробували на гравійному бетоні та його вплив на K_{2c} і J_{2c} . Також досліджено вплив на стійкість при високих температурах, зокрема на K_{Ic} .

Розглянуто дослідження на різних рівнях спостереження та описані характеристики матеріалів з цементними матрицями. Також описані структурні мікро- та макроскопічні дослідження лінії профілю руйнування. Наведено дані про практичне застосування даних, висвітлених у цій роботі. Представлено висновки та резюме одержаних результатах.

У роботі [11] викладено ефективні методи оцінки несучої здатності, тріщиностійкості та НДС в залізобетонних балкових елементах, досліджуваних на підставі концепцій пружно-пластичної механіки руйнування і механіки



залізобетону. Розроблені теоретичні методи визначення граничного стану залізобетонних конструкцій при коротко- та довготривалих навантаженнях. Зокрема, сформульовано розрахункові моделі і розв'язано задачі утворення та докритичного розвитку тріщин у нестационарній постановці. Узагальнено і опрацьовано результати експериментальних досліджень та їх порівняння із розрахунковими даними.

У роботі [12] розглянуто моделі руйнування і застосування їх до залізобетону. Зокрема, наведені відомості про основні положення механіки руйнування, короткий огляд досліджень з механіки руйнування бетону і залізобетону та описані існуючі методи визначення величини критичного коефіцієнта інтенсивності напружень у бетоні. Представлено відомості про теоретичні основи механіки руйнування залізобетону, де розглянуто загальні положення, критичний коефіцієнт інтенсивності напруження для згинального залізобетонного елемента та модель зони порушеного зчеплення і деякі припущення розрахунку ресурсу конструкції. Наведено низку експериментальних досліджень для обґрунтування теоретичних підходів. Описано напружено-деформований стан залізобетонних балок у перерізах з тріщинами. Наведені моделі тріщини нормального відриву і тріщини поперечного зсуву. Сформульовано основні положення розрахунку бетонних та залізобетонних елементів і наведені приклади розрахунку та їх порівняння з експериментальними даними.

У роботі [13] описано основні положення механіки руйнування, моделі руйнування бетону і залізобетону, теоретичні і експериментальні засади і теорії, а також основні положення розрахунку та структури бетонних і залізобетонних елементів. Наведено основні параметри тріщиностійкості бетону і технологія підбору складу бетону із врахуванням тріщиностійкості його структури. Дослідження розвитку тріщин у бетонних елементах при довготривалих і циклічних навантаженнях та їх руйнування і відновлення посиленних і зруйнованих залізобетонних елементів. Наведено розрахунок довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій та розглянуті спеціальні задачі механіки руйнування бетону і залізобетону.

У роботі [14] викладені сучасні погляди на механіку руйнування бетону і залізобетону. На широкому експериментальному матеріалі висвітлені процеси деформування і руйнування у широкому діапазоні температур, вологості і силових впливів на бетонні і залізобетонні елементи. Охоплено велику кількість питань, які включають пояснення причини руйнування бетону, визначення характеристик його тріщиностійкості, розрахунок параметрів тріщин бетону при різних температурно-вологісних режимах, впровадження механіки руйнування бетону в прак-

тику будівництва і розрахунку конструкцій за несучою здатністю і довговічністю. Викладені особливості мікро- і макроструктури бетону, який розглядається як суттєво неоднорідний матеріал.

У роботі [15] узагальнено низку робіт з механіки руйнування бетонних і залізобетонних конструкцій та на їх основі сформульовано суть розроблених авторами моделей і критеріїв, існуючих в лінійній та нелінійній механіці руйнування. Висвітлено результати дослідження міцності, тріщиностійкості та НДС бетонних і залізобетонних конструкцій. Розроблено та опрацьовано методи оцінки міцності і тріщиностійкості, досліджених на підставі концепцій пружно-пластичної механіки руйнування та механіки залізобетону. Сформульовано розрахункові моделі і подано розв'язки задач з утворення та докритичного росту тріщин у нестационарній постановці. Перевірку критеріїв і моделей розкриття та підростання тріщини і зони передруйнування виконувались на балкових зразках при розтягу, при згині, при позацентровому стиску і розтягу. Представлено також аналіз і синтез експериментальних досліджень та їх порівняння із розрахунковими.

У роботі [16] розглянуто методи оцінювання несучої здатності елементів конструкції з погляду їх тріщиностійкості із застосуванням силових енергетичних та деформаційних моделей. Дано визначення залишкового ресурсу конструкцій на основі застосування рівнянь циклічної тріщиностійкості. Розглянуті температурні залежності і характеристики опору розвитку тріщин та визначення критичних температур крихкості. Наведено приклади та задачі.

У роботі [17] узагальнено і висвітлено основні концепції механіки руйнування та міцності мостових конструкцій. Відзначено загальний стан, проблеми та класифікації мостів України. Зокрема, наведена загальна оцінка, технічний стан мостів, проблеми галузі та системи експлуатації мостів. Також описана класифікація мостів за довжиною, за призначенням, за матеріалом, за статичною схемою, за типом несучої конструкції, за типом армування, за типом залізобетону. Виконано аналіз і синтез проблем і завдань щодо забезпечення міцності та надійності залізобетонних мостів в Україні. Розглянуто пошкодженість залізобетонних конструкцій мостів після тривалої експлуатації, методи розрахунку з урахуванням тривалої експлуатації та описані інші аспекти мостів, які базуються на засадах механіки руйнування.

У праці [18] викладено відомості про дослідження, випробування і розрахунок переважно залізобетонних мостів і шляхопроводів. Наведено історичні відомості про мости, зокрема про різновиди мостів, епоху металу у мостобудуванні, епоху залізобетонних мостів, сучасні мости та стан і проблеми мостів України,



вибір та трасування мостів. Зокрема, значна увага приділена залізобетонним мостам, їх конструкціям і надійності. Представлено особливі випадки розрахунку на динамічні навантаження залізобетонних аркових, балкових та рамних мостів, враховуючи основні засади механіки руйнування та будівельної механіки. Зокрема, детально описано проектування балкових мостів з розрізними прогонами, нерозрізні рамні та аркові мости і підвісні, вантові та розвідні мости і конструкції підвісних систем. Особливі випадки розрахунку на міцність і довговічність, прогнозування залишкового ресурсу мостів, зокрема врахування ушкодження та деградацію матеріалу. Значна увага приділена прогнозуванню залишкової довговічності мостів після тривалої експлуатації. Також приділено увагу дослідженню та випробуванню мостів з використанням діагностики та неруйнівних методів досліджень. Ретельно розроблено принципи аналізу і оцінки надійності мостів та їх елементів.

У роботі [19] викладено аналіз і синтез методів та засобів проведення експериментальних досліджень, зокрема і досліджень тріщиностійкості матеріалів методами механіки руйнування. Розглянуто неруйнівні, руйнівні методи контролю випробувань та створення засобів для їх виконання. Наведені дані про створені давачі тиску та деформації і нові типи багатофункціональних сенсорів магнітного поля та температури. Описано способи і методи випробування матеріалів, конструкцій та споруд. Визначено основні характеристики будівельних матеріалів, зокрема тріщиностійкість і деформації бетонів. Зокрема, експериментальні методи росту тріщин і тріщиноподібних дефектів, – це метод пружної податливості, ультразвуковий метод, метод різниці електричних потенціалів, метод акустичної емісії, оптичні методи, метод вихрових струмів, магнітні методи, метод сигнальних здавачів, фрактографічні методи та способи вимірювання розкриття й довжини тріщин у залізобетонних конструкціях та з наведеними схемами, залежностями (формулами) на відповідних зразках. Значну увагу приділено методам теорії ймовірності та математичної статистики, зокрема, прийоми і методи фізичного, технічного і математичного моделювання.

У монографії [23] узагальнені основи розрахунку залізобетонних конструкцій за діючими нормами України, які спираються на засади нелінійної деформаційної моделі. Розглянуті нові моделі формування залізобетонних конструкцій, розроблені на заміну діючих нормативних документів. Представлені алгоритми та виконані приклади розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами першої та другої груп, які дають змогу порівняти результати розрахунків, виконаних за міцністю, тріщиностійкістю та

жорсткістю за діючими нормами України та новими моделями деформування залізобетону.

У роботі [29] сформульовано проблемні завдання розвитку гіпотез механіки руйнування стосовно розрахунку залізобетонних конструкцій при наявності тріщин. Наведено основні аспекти механіки руйнування, що акцентують увагу на особливостях зони передруйнування, а також гіпотези і передумови, покладені в основу розрахунку залізобетонних конструкцій за другою групою граничних станів. Описано особливості вирізання двуконсольного елемента, що включає тріщину, для побудови ефективного розрахункового апарату залізобетону з урахуванням фізичної нелінійності, процесів тріщиноутворення, зчеплення арматури з бетоном і ефекту порушення суцільності. Отримано нове рішення задачі про напружено-деформований стан залізобетонного елемента в зоні, що безпосередньо прилягає до тріщини.

У статті [30] поставлено проблему приведення у відповідність значень дослідних і теоретичних параметрів тріщиноутворення залізобетонних конструкцій на прикладі проведених експериментальних досліджень залізобетонних конструкцій при крученні зі згином з урахуванням деформаційних впливів. Отримано дослідні дані тріщиноутворюючого навантаження, значень ширини розкриття тріщин по всьому профілю тріщин, відстаней між ними, що доповнюють наявний експериментальний матеріал. При цьому основний акцент зроблено на основні положення, робочі гіпотези і тонкий інструментарій механіки руйнування, адаптований до залізобетону. Як трансформаційний елемент між залежностями механіки руйнування та теорії залізобетону було обрано двоконсольний елемент. Розроблення такого двоконсольного елемента дозволить уникнути громіздких математичних перетворень із використанням комплексних чисел при виведенні розрахункових залежностей, прийнятих щодо практичного використання.

У роботах [31, 32] розвинені гіпотези механіки руйнування стосовно врахування ефекту порушення суцільності залізобетонних конструкцій при різних силових впливах зі спрощенням її енергетичного функціонала. Розглянуто специфіку побудови двоконсольного елемента у зонах, безпосередньо прилеглих до тріщин. Отримано нову аналітичну залежність, яка пов'язує дотичне зусилля, що виникає в безпосередній близькості від тріщини, з довжиною її розвитку через питому енергію утворення нових поверхонь тріщин. Після утворення тріщин у залізобетонних конструкціях суцільність бетону порушується і його деформування вже не підкоряється законам суцільного тіла. У зонах, прилеглих до тріщин, виникає концентрація деформацій, що перенасичує потреби «системи», що складається з бетон-



них блоків і арматури. Як показали проведені експериментальні дослідження, причиною НДС у зонах, прилеглих до тріщин, є додатковий деформаційний вплив в тріщині, що необхідно враховувати в розрахунку. При цьому виявлено зв'язок складових НДС у зоні обурення з питомою енергією утворення нових поверхонь тріщини, що звільняється в зоні передруйнування. Отримав подальшого розвитку функціонал механіки руйнування стосовно до розрахунку залізобетонних конструкцій. Розроблено трансформаційний елемент, що пов'язує залежності механіки руйнування стосовно розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами другої групи. Описані особливості вирізання двоконсольного елемента, що включає тріщину, для побудови ефективного інструментарію розрахунку залізобетону з урахуванням фізичної нелінійності, процесів тріщиноутворення, зчеплення арматури з бетоном і ефекту порушення суцільності. Наведено результати розробки двоконсольних елементів механіки руйнування при різних силових впливах: згині, позацентровому стиску, центральному розтязі, а також у зоні похилих тріщин.

Отже, підсумовуючи результати аналізу дослідження тріщиностійкості бетонів з позиції механіки руйнування, на думку автора, можна відзначити доцільність застосування для оцінки міцності конструкційних бетонів деформаційних моделей, які наведено в роботах [23, 29 ÷ 32], а також на рис. 1. На рис. 2, а показано уточ-

Таблиця 1 – Експериментальне [21] та розрахункове δ_d

f_{ctk} , МПа	$E_c \cdot 10^4$, МПа	ν	K_{lc} , МПа $\sqrt{м}$	$\delta_d \cdot 10^{-6}$, 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 табл. 1 у чисельнику наведено експериментальні дані [21], а у знаменнику – розрахункові за поданою нижче формулою.

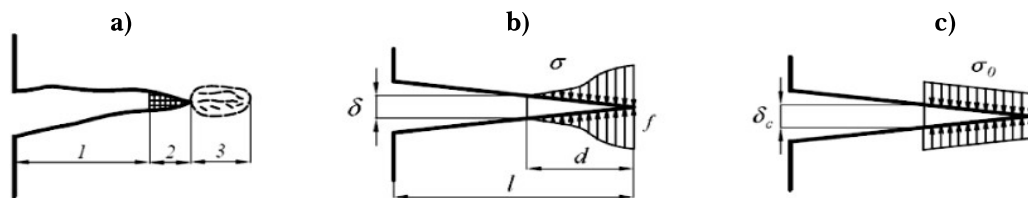


Рисунок 1 – Моделювання тріщини у бетоні: а – зони тріщини (1 – ділянка вільна від зусиль зчеплення берегів тріщини; 2 – ділянка зчеплення за рахунок заповнювачів; 3 – зона мікророзтріскування);

б – модель фіктивної тріщини Хіллерборга (d – зона непружної взаємодії,

σ – нормальні напруження зчеплення, f – міцність на розрив); с – модель Леонова-Панасюка

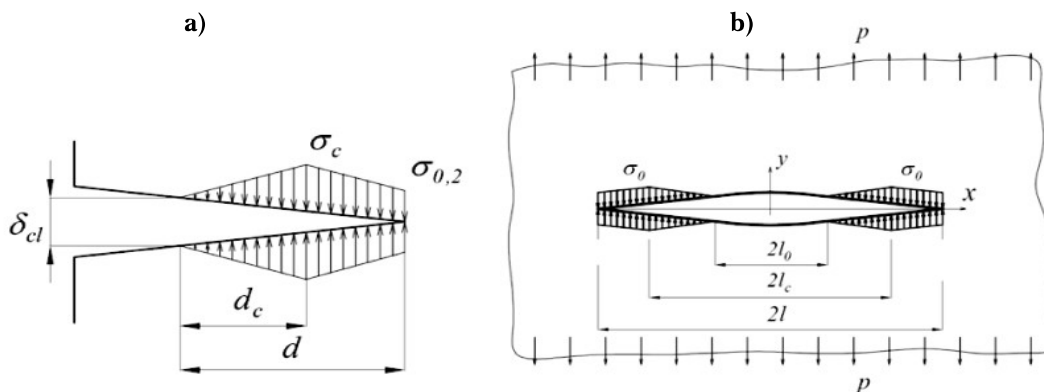


Рисунок 2 – Деформаційна модель руйнування бетону [20] та її апробація:

а – моделювання зони передруйнування; б – розтяг безмежної пластини з тріщиною у випадку пружно-пластичного моделювання



нення моделювання зони передруйнування та його обґрунтування при розтягненні безмежної пластини з тріщиною; на рис. 2, б – у випадку пружно-пластичного моделювання [20]. 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 [21] і представлених у табл. 1.

Теоретичне значення критичного розкриття тріщини δ_{cl} визначаємо за формулою, отриманою в рамках тристадійної моделі [20]:

$$\delta_{cl} = \frac{3\pi CK_{lc}^2}{\sigma_0},$$

де $\sigma_0 = (\sigma_c + c_{02})/2$; C – константа, для узагальненого

плоского напруженого стану $C = 1/nE$; для плоскої деформації $C = (1-\nu^2)/nE$, де ν – коефіцієнт Пуассона, E – модуль пружності бетону.

Підсумовуючи результати аналізу дослідження основних концепцій визначення тріщиностійкості залізобетонних конструкцій з позиції механіки руйнування, на думку авторів, можна відзначити доцільність застосування деформаційних підходів, концепцій і моделей, представлених на рис. 3, для оцінки міцності і тріщиностійкості залізобетонних балкових конструкцій. Зокрема, на рис. 3, а, б, с на основі δ_c моделі розв'язано задачу про напруження в балці на початку руйнування [22].

Тріщини в балці моделюються півплощиною із системою клинів, а довжину тріщини знаходять із умови, коли K_I досягає критичного значення K_{lc} . Суттєвим вкладом в розвиток теорії механіки руйнування залізобетону є роботи

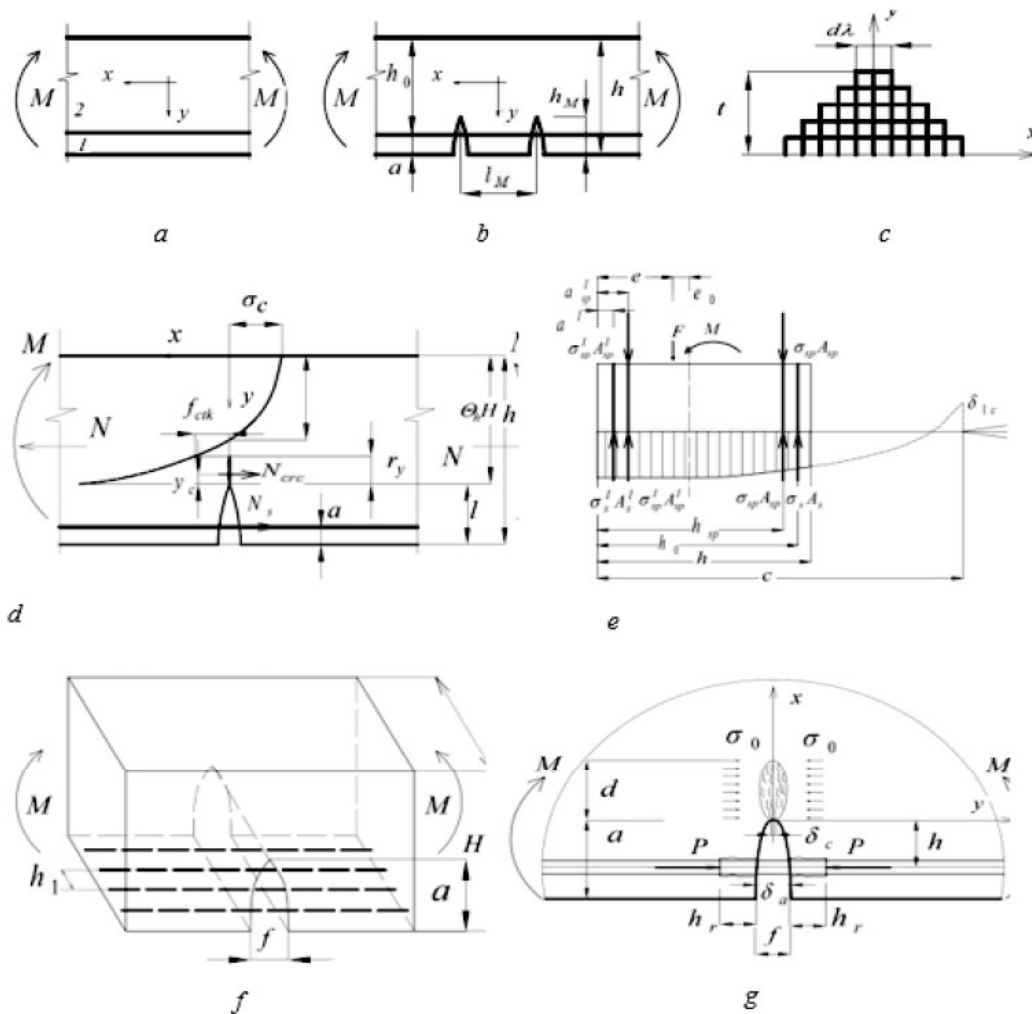


Рисунок 3 – Основні розрахункові моделі для визначення міцності і тріщиностійкості залізобетонних балкових та позациентрово стиснутих конструкцій з позиції механіки руйнування:

а, б, с – модель наведена у роботі [22]; д – модель наведена у роботі [23], е – модель наведена у роботах [24, 25]; ф, г – модель наведена у роботах [2, 26 ÷ 28]



Є.М. Пересипкіна. Зокрема, на рис. 3, d представлено розрахункову модель балки з тріщиною, яка наведена у роботі [8]. Також заслуговує на увагу розрахункова модель при позacentровому стиску з фіктивною тріщиною для двотаврового залізобетонного елемента, яка наведена у роботах [24, 25]. У всіх вищенаведених моделях механіки руйнування залізобетону стержневу арматуру розглядають як пружну смугу, що зумовлює деякі некоректності у визначенні НДС таких елементів. У роботі [26] при просторовому розв'язку задачі доведено допустимість заміни стержневої арматури пружною смугою відповідно до геометричних параметрів арматури. Запропоновано метод, за яким стримуючий вплив арматури на розкриття тріщин у плитах, армованих періодично арматурними стержнями (рис. 3, f) та балок, а просторова модель, яка наведена на рис. 3, g, моделюють періодичною системою зосереджених зусиль та враховують відшарування арматури і бетону біля тріщини.

Результати обчислень за моделлю, представленою на рис. 3, f, g, для балок Є.А. Гузеєва та К.Л. Махто подано у табл. 2 та у роботі [15].

НАУКОВА НОВИЗНА

Вперше за останні 30 років узагальнено результати експериментальних і теоретичних досліджень різних вчених з механіки руйнування бетону і залізобетонних конструкцій, зокрема критеріїв і моделей руйнування, а також розроблені на їх основі методики визначення НДС та оцінки міцності та тріщиностійкості і залишкового ресурсу їх експлуатації у повітряному, водному і ґрунтовому середовищах.

ПРАКТИЧНА ЗНАЧИМІСТЬ

Практичне значення проведених досліджень полягає у можливості використання отриманих та узагальнених у монографіях теоретичних і експериментальних значень критеріїв і моделей, методик визначення НДС бетонних і залізобетонних конструкцій та оцінки їх надійності і довговічності.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу та синтезу науково-

Таблиця 2 – Результати обчислень параметрів тріщиностійкості на основі критерію Ірвіна

Навантаження, кНм	Довжина тріщини, см	КІН, $K_I^{(M)}$, МПа $\sqrt{м}$	КІН, $K_I^{(a)}$, МПа $\sqrt{м}$	КІН, K_I , МПа $\sqrt{м}$
Для балки Є.А. Гузеєва				
87	5	10,44	9,53	0,21
	10	11,69	9,52	2,17
	15	13,41	9,28	4,13
	20	14,32	5,55	8,77
	21,5 кр.	14,94	5,68	9,26
75	5	11,90	10,71	1,19
	10	13,66	11,15	2,51
	15	14,85	9,95	4,90
	19,7 кр.	15,73	6,47	9,26
50	5	11,09	9,25	1,84
	10	13,82	9,62	4,20
	15,2 кр.	17,90	8,64	9,26
Для балки К.Л. Махто				
93	5	14,93	13,67	1,26
	10	16,36	13,68	2,68
	15	19,12	12,19	6,93
	16,4 кр.	19,77	11,02	8,75
75	5	12,47	10,79	1,68
	10	14,22	9,99	4,23
	14,3 кр.	17,44	8,69	8,75
50	5	10,88	8,03	2,85
	10	12,17	5,83	6,34
	12,2 кр.	16,39	7,64	8,75

технічних джерел з механіки руйнування бетону і залізобетонних конструкцій та підсумовуючи результати, які наведені у монографіях та статтях за останні 30 років з оцінки визначення надійності та залишкового ресурсу таких конструкцій, можна сформулювати наступні узагальнення:

1. Міцність бетону на розтяг визначається розвитком контактних тріщин між заповнювачем і матрицею та зростає зі зростанням міцності контактних зон. Відносний рівень границі K при стику визначається зростанням міцності контактної зони K_{lc} , зокрема, міцності бетону та стійким зростанням тріщини контактної зони. Нелінійність деформування бетону при стику суттєво залежить від розповсюдження тріщини поперек крупного заповнювача або огинає його.
2. Дослідження методів механіки руйнування до оцінки температурної тріщиностійкості масивних бетонних споруд наведено у роботах Л. М. Трапезнікова, які узагальнені



- у монографії [7]. Поглиблено вивчаючи застосування методів механіки руйнування було сформульовано двопараметричну модель оцінки тріщиностійкості масивних гідротехнічних споруд, зокрема в площинах руйнування бетону з врахуванням структури і повзучості бетону. У цій роботі також наведено і другий варіант моделі, який дає нижню границю, а перший – верхню границю тріщиностійкості бетону. У третьому варіанті розглянута трипараметрична модель, яка дає задовільні результати тріщиностійкості бетону при згині.
- У роботі [9] описані основи лінійної та нелінійної механіки руйнування на підставі досліджень інших авторів для практичного застосування для розрахунку конструкцій і практичне визначення параметрів механіки руйнування. Також тріщиностійкість бетонів, виконаних на засадах механіки руйнування, значна кількість експериментальних досліджень виконана авторами, які описані у роботі [12], але узагальнених висновків не наведено. Автор, у роботі [13], запропонував вирішення питань довговічності залізобетону на підставі підходів механіки руйнування, теорії тріщин і основних її параметрів ефективної енергії руйнування G і K_{Ic} і коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Ic} і K_{2c} – фізичних констант.
 - У монографії [10] наведені результати широкомасштабних експериментальних досліджень моделей та критерії механіки руйнування важких бетонів різної міцності та складів, зокрема, ґрунтовні дослідження та одержані експериментальні дані коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Ic} і K_{2c} та ефективної пружної роботи J_{2c} інтегралу. Виконано також ґрунтовний аналіз структури різних складів та міцності зовнішнього впливу крупних заповнювачів, щебневих і гравійних бетонів, водоцементного відношення та температури на вказані характеристики механіки руйнування.
 - Автор роботи [14] запропонував науково-обґрунтований метод розрахунку довговічності бетону конструкції з використанням підходів механіки руйнування та накопичення різних дефектів бетонів до критичної маси S_c . Дано подальший розвиток фізичної моделі кінетики руйнування бетону як структури, яка складається із системи зерен (клінкера, піску, щебню) зі зв'язками взаємотяжіння. Зауважимо, що розроблена модель є обґрунтованою ієрархічною системою, придатною для опису процесів руйнування бетону на будь-яких рівнях розгляду його структури. Виконані експериментальні дослідження залежностей K_{Ic} , G і J_1 від міцності розчинної частини f_{ctk} і об'ємної концентрації крупного заповнювача і на цій основі розроблена методика несучої здатності і тріщиностійкості.
 - На даний час можливості використання δ_c – моделі Леонова-Панасюка до проблеми виникнення і розвитку тріщин у бетоні вивчені на належному рівні. Тут для практичних задач треба розв'язати дві проблеми. Перша – це стабілізація росту тріщин, що можна вирішити, використавши роботи Жукова та інших [11–15], в яких це ж питання вирішено для K_{Ic} . Друга – визначення постійної величини σ_0 потребує вимог подальших досліджень фізичних умов міцності бетону і уточнення розробки методики її визначення. На нашу думку вона частково вирішена у роботі [15].
 - Перспективним для сьогодення залишається застосування моделі когезійної тріщини і інших подібних моделей, тому що можна використовувати незалежно від розміру зразка, а також при руйнуванні, яке починається необов'язково від наявної у зразку тріщини або надрізу.
 - На сьогодення теорія міцності і тріщиностійкості залізобетонних конструкцій з тріщинами характеризується поділом на два основні напрямки, між якими майже немає істотного зв'язку, – механіку залізобетону та механіку руйнування залізобетону (застосування методів лінійної та пружно-пластичної механіки руйнування до залізобетону [11, 15, 19]).
 - Розрахункові моделі механіки залізобетону базуються переважно на поправочних коефіцієнтах, які вводяться на підставі емпіричних даних, без розгляду фізичного змісту явищ тріщиноутворення та підростання тріщин, і тому не забезпечують надійності результатів для всіх стадій навантаження та видів напруженого стану. Інженерне застосування механіки залізобетону на даний час виправдовується лише їх простотою і зручністю при інженерних розрахунках [11, 15, 19].
 - На підставі досліджень, наведених у роботах [6 ÷ 19], можна запропонувати методологію оцінки тріщиностійкості залізобетону. Зокрема, застосувавши методику механіки руйнування до залізобетону, можна забезпечити фізичне обґрунтування розрахункових залежностей. Розвиток даного напрямку [23, 29 ÷ 32] передбачає використання досягнень механіки залізобетону, а саме значної частини накопичених експериментальних даних та розрахункових моделей,



які себе виправдали при розрахунках певного виду напруженого стану.

11. Методи оцінки контакту арматури з бетоном мають низку недоліків і вимагають уточнення і подальшого дослідження. Теоретичні засади і залежності анкерування арматури у бетоні [8, 11, 15, 19] розроблені для певних рівнів НДС і не можуть описати всіх етапів навантаження. На сьогодні немає загальноприйнятої думки про характер контактних напружень $\tau(x)$ та їх зміни.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Лучко И. И. Механика разрушения бетона (обзор). ФХММ. 1991. № 3. С. 97 – 110.
2. Лучко Й. Й. Основні концепції механіки руйнування залізобетону ФХММ. 1995. № 4. С. 42 – 48.
3. Лучко Й. Й. Основні фактори середовища, які впливають на деградацію транспортних споруд із залізобетонних і металевих гофрованих конструкцій. Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали ХХІІ Міжнародного науково-практичного форуму, Львів, 5–7 жовт, 2021. Львів: ННВК “АТБ”. 2021. Т. 2. С. 203–206.
4. Лучко Й. Й. Дослідження збудованих мостів які були зруйновані повеннями на Україні в 1998 і 2001 роках та тривалої експлуатації Дніпро: 36. наук. праць «Мости і тунелі: Теорія, дослідження, практика. 2021. № 20. С. 26-38.
5. Luchko J. Degradating concrete and reinforced building structures and long-term structures. Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Odessa: OSACEA. 2022. № 86. P. 35–46.
6. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. Москва: Стройиздат, 1982. 196 с.
7. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
8. Пересыпкин Е.Н. Расчет стержневых железобетонных элементов. Москва: Стройиздат, 1988. 168 с.
9. Керштейн Н.М. Основы экспериментальной механики разрушения бетона и железобетона. Москва: Изд-во Москв. ун-та, 1989. 140 с.
10. Prokopski Grzegorz. Analiza związku struktury z odpornością betonow na pekanie. Czestochowa: Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej, 1990. 165 с.
11. Лучко Й.Й. Методи оцінки несучої здатності і підвищення тріщиностійкості залізобетонних елементів конструкцій: монографія. Львів: «Слово і комерція», 1997. 435с.
12. Пирадов К.А. Механика разрушения железобетона Москва: Издательский центр «Новый век», 1998. 189 с.
13. Пирадов К.А. Теоретические и экспериментальные основы механики разрушения бетона и железобетона. Тбилиси: “Энергия”, 1998. 355 с.
14. Леонович С.П. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения. Минск: Редакция журнала «Тыздзень», 1999. 266 с.
15. Лучко Й.Й. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування. Львів: Каменярь, 1999. 348 с.
16. Карпілов А.А. Прикладна механіка руйнування. Підручник. Київ: «Опір», 1999. 175с.
17. Лучко Й. Й. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності: довідник. Львів: Каменярь, 2004. 885 с.
18. Мости: конструкція та надійність: довід. За ред. В. В. Панасюка, і Й. Й. Лучка. Львів: Каменярь, 2005. 989с.
19. Лучко Й.Й. Методи дослідження та випробування будівельних матеріалів і конструкцій: монографія. Львів: Вид-во «Левада», 2020. 495 с.
20. Панасюк В.В. Деформаційна модель руйнування бетону. Проблеми міцності. 2003. № 2. С. 18-28.
21. Лучко Й.Й. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування: монографія. Львів: Каменярь, 1999. 348 с.
22. Русинко К.Н., Артыкова С.И. О разрушении твердого тела при неоднородном напряженном состоянии. Проблемы прочности. 1973. №2. С.43-47.
23. Бамбура А.М., Павліков А.М., Колчунов В.І. та ін. Практичний посібник із розрахунку залізобетонних конструкцій за діючими нормами України (ДБН В.2.6–98:2009) та новими моделями деформування, що розроблені на їхню заміну. Київ: Толока, 2017. 627 с.
24. Лучко Й.Й., Лазар В.Ф., Чубріков В.М. Міцність залізобетонного елемента з тріщиною з погляду механіки руйнування. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2001. № 1. С. 27 – 36.
25. Лучко Й.Й., Лазар В.Ф. Розрахунок напружень та оцінка міцності і тріщиностійкості залізобетонних балкових елементів. Фізико-



хімічна механіка матеріалів. 2002. № 1. С. 107 – 116.

26. Андрейків О.Є., Лучко Й.Й., Гембара Т.В. Розрахунок залізобетонних балочних елементів методами механіки руйнування. Львів: ФМІ АН України, 1993. (Препринт. ФМІ АН. №183). 55 с.
27. Лучко Й.Й., Гембара Т.В. Методичні рекомендації з розрахунку тріщиностійкості залізобетонних балкових елементів конструкцій. Львів: ФМІ НАН України, 1995. 49 с.
28. Андрейків О.Є., Лучко Й.Й., Ковчик С.Є. Методика визначення тріщиностійкості залізобетонних конструкцій. Зб.наук.праць. Діагностика, довговічність та регенерація мостів будівельних конструкцій із застосуванням сучасних технологій та матеріалів. Львів: Каменяр, 1999. № 1. С. 6 – 17.
29. Iakovenko I.A., Kolchunov V.I. The development of fracture mechanics hypothesis applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. № 15(3). P. 371–380.
30. Колчунов В.І. Приведення у відповідність дослідних даних тріщиностійкості залізобетонних конструкцій їх теоретичним значенням. *Наука та будівництво*. 2018. №1 (15). С. 42–49.
31. Яковенко І.А. Трансформаційний елемент, що пов'язує залежності механіки руйнування з теорією залізобетону. *Наука та будівництво*. 2018. №4 (18). С. 28–37.
32. Iakovenko, I.(2018). The Development of Transformation Elements between the Fracture Mechanics Dependences and the Equations of the Reinforced Concrete Theory. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. № 7(4.8). P. 58-64.

REFERENCES

1. Luchko, I. I. (1991). Mechanics of concrete destruction (review). *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv (Physical and Chemical Mechanics of Materials)*, (3), 97-110.
2. Luchko, Y. Y. (1995). Basic concepts of fracture mechanics of reinforced concrete. *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv (Physical and Chemical Mechanics of Materials)*, (4), 42-48.
3. Luchko, Y. Y. (2021). The main environmental factors affecting the degradation of transport structures from reinforced concrete and corrugated metal constructions. In *Theory and Practice of Agro-Industrial Complex and Rural Areas Development: Proceedings of the*

XXII International Scientific and Practical Forum (Vol. 2, pp. 203-206). Lviv: ATB.

4. Luchko, Y. Y., Karhut, I. I., & Kravets, I. B. (2021). Research on bridges that were destroyed by floods in Ukraine in 1998 and 2001 and long-term operation. *Collection of Scientific Works "Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice"*, (20), 26-38.
5. Luchko, J., Nazarevich, B., & Kovalchuk, V. (2022). Degrading concrete and reinforced building structures and long-term structures. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (86), 35–46.
6. Zaitsev, Y. V. (1982). *Modeling of deformations and strength of concrete by methods of fracture mechanics*. Moscow: Stroyizdat.
7. Trapeznikov, L. P. (1986). *Temperature crack resistance of massive concrete structures*. Moscow: Energoatomizdat.
8. Peresypkin, E. N. (1988). *Calculation of rod reinforced concrete elements*. Moscow: Stroyizdat.
9. Kershtein, N. M., Klyushnikov, V. D., & Lomakin, E. V. (1989). *Fundamentals of the experimental mechanics of the destruction of concrete and reinforced concrete*. Moscow: Moscow University Publishing House.
10. Prokopski, G. (1990). *Analysis of the relationship of structure to the resistance of concretes to cracking*. Czestochowa: Publishing House of the Czestochowa University of Technology.
11. Luchko, Y. Y. (1997). *Methods of assessing the load-bearing capacity and increasing the crack resistance of reinforced concrete structural elements*. Lviv: Word and Commerce.
12. Piradov, K. A., & Guzeev, E. A. (1998). *Mechanics of destruction of reinforced concrete*. Moscow: New Century Publishing Center.
13. Piradov, K. A. (1998). *Theoretical and experimental foundations of the mechanics of destruction of concrete and reinforced concrete*. Tbilisi: Energy Publishing House.
14. Leonovich, S. P. (1999). *Crack resistance and durability of concrete and reinforced concrete elements in terms of the force and energy criteria of fracture mechanics*. Minsk: Tyzden Magazine Publishing House.
15. Luchko, Y.Y., Chubrikov, V.M., & Lazar, V.F. (1999). *Strength, crack resistance, and durability of concrete and reinforced concrete structures on the principles of fracture mechanics*. Lviv: Kamenyar.
16. Karpilov, A. A. (1999). *Applied mechanics of destruction*. Kyiv: Resistance Publishing House.
17. Luchko, Y.Y., Sulym, G.T., & Kiryan, V.I. (2004). *Mechanics of destruction of bridge structures and methods for predicting their residual durability*. Lviv: Kamenyar.



18. Luchko, Y.Y., Koval, P.M., & Korniev, M.M. (2005). *Bridges: Structures and reliability*. Lviv: Kamenyar.
19. Luchko, Y. Y. (2020). *Methods of research and testing of building materials and structures*. Lviv: Levada Publishing House.
20. Panasyuk, V.V., Luchko, Y.Y., & Panko, I.M. (2003). Deformation model of concrete destruction. *Problems of Strength*, (2), 18-28.
21. Luchko, Y. Y., Chubrikov, V. M., & Lazar, V. F. (1999). Strength, crack resistance, and durability of concrete and reinforced concrete structures on the principles of fracture mechanics. Lviv: Kamenyar.
22. Rusinko, K. N., & Artykova, S. I. (1973). On the destruction of a solid body under a non-uniform stress state. *Problems of Strength*, (2), 43-47.
23. Bambura, A.M., Pavlikov, A.M., & Kolchunov, V.I. (2017). *Practical manual for the calculation of reinforced concrete structures according to current norms of Ukraine (DBN V.2.6-98:2009) and new deformation models developed to replace them*. Kyiv: Toloka.
24. Luchko, Y.Y., Lazar, V.F., & Chubrikov, V.M. (2001). Strength of a reinforced concrete element with a crack from the perspective of fracture mechanics. *Physical and Chemical Mechanics of Materials*, (1), 27-36.
25. Luchko, Y. Y., & Lazar, V. F. (2002). Calculation of stresses and assessment of the strength and crack resistance of reinforced concrete beam elements. *Physical and Chemical Mechanics of Materials*, (1), 107-116.
26. Andreikiv, O.E., Luchko, Y.Y., & Gembara, T.V. (1993). *Calculation of reinforced concrete beam elements by methods of fracture mechanics: preprint*. Lviv: Institute of Physics and Mechanics.
27. Luchko, Y.Y., & Gembara, T.V. (1995). *Methodical recommendations for the calculation of crack resistance of reinforced concrete beam structural elements*. Lviv: Institute of Physics and Mechanics.
28. Andreikiv, O.E., Luchko, Y.Y., & Kovchik, S.E. (1999). *Methodology for determining the crack resistance of reinforced concrete structures*. Lviv: Kamenyar.
29. Iakovenko, I.A., & Kolchunov, V.I. (2017). The development of fracture mechanics hypothesis applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*, 15(3), 371-380. <https://doi.org/10.5937/jaes15-14662>.
30. Kolchunov, V.I., Demianov, O.I., Iakovenko, I.A., & Garba, M. O. (2018). Bringing experimental data on the crack resistance of reinforced concrete structures to their theoretical values. *Science and Construction*, (1), 42-49.
31. Iakovenko, I.A. (2018). Transformation element that links the dependencies of fracture mechanics to the theory of reinforced concrete. *Science and Construction*, (4), 28-37. <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v18i4.54>.
32. Iakovenko, I. (2018). The Development of Transformation Elements between the Fracture Mechanics Dependences and the Equations of the Reinforced Concrete Theory. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.8), 58-64. <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27214>.

Стаття надійшла до редакції 02.03.2024 року