

## ДО ОБГРУНТУВАННЯ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ОЦІНКИ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ ЕЛЕМЕНТІВ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ

С. Ю. Богдан

*Національний авіаційний університет, Київ*

Запропоновано метод до оцінки граничного стану бетонних і залізобетонних конструкцій з використанням методів механіки руйнування. Показано перспективність даного напрямку досліджень. Обґрунтовується необхідність урахування даного методу в нормативних документах при оцінці граничних станів бетонних та залізобетонних конструкцій, які мають експлуатаційні дефекти.

Існуюча система нормативних документів у будівництві виходить з основної вимоги до забезпечення безпеки споруди, яка проектується або експлуатується, пов'язаної з її здатністю зберігати параметри безпеки в період будівництва, поточної експлуатації або ремонту.

Оцінюючи показники безпеки при проектуванні або експлуатації споруди та напруженого стану бетонних і залізобетонних конструкцій, застосовують різні нормативні методи та підходи, серед яких важливе місце посідають експериментальні методи досліджень [1, 2] та розрахунково-теоретичні, переважно на основі теорій міцності та граничної рівноваги [3 - 5].

Окрему групу методів досліджень за даним напрямком займають методи механіки руйнування, що дає змогу оцінити несучу здатність елементів конструкцій з використанням енергетичних і деформаційних критеріїв [6 - 9]. Стосовно до залізобетонних і бетонних елементів будівель і споруд у Національному авіаційному університеті розроблено метод оцінки їх граничного стану з використанням механіки руйнування [10, 11]. Він знайшов застосування при розрахунку ряду відповідальних споруд в атомній енергетиці, зокрема конструкцій об'єкта «Укриття» ЧАЕС і захисних споруд ХОЯТ [11, 12] та інших конструкцій [15].

При оцінці міцності реальних тіл основні положення запропонованого методу враховують наявність у матеріалі випадково зорієнтованих і розподілених в об'ємі тіла найдрібніших тріщин, краї яких є областями локального збурення поля напружень. Розтягуючі напруження сприяють розкриттю тріщин, розташованих нормально до них. Одна або декілька таких найбільш небезпечних тріщин є джерелом макроруйнування [6]. Експериментальні дослідження показують, що досягнення поточними напруженнями  $\sigma_i$  в розтягнутій зоні перерізу значень границі міцності матеріалу на розтягання  $\sigma_0^+$  призводить до виникнення зони локалізованої деформації та області передруйнування.

У запропонованому методі вектор еквівалентних напружень  $\{\sigma_{eq}\}$  є функцією вектора поточних  $\{\sigma_i\}$  і головних напружень  $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ . У загальному випадку для двомірної задачі ( $i = 1, 2$ )

$$\{\sigma_{eq}\} = f\{\sigma_i\} = f\{\sigma_1, \sigma_2\}. \quad (1)$$

Тоді критерій міцності можна представити у вигляді функціональної залежності між  $\{\sigma_{eq}\}$  і  $\sigma_0^+$  у вигляді

$$\{\sigma_{eq}\} = f\{\sigma_i\} \leq \sigma_0^+, \quad (2)$$

де  $\{\sigma_{eq}\}$  - вектор еквівалентних напружень;  $\sigma_0^+$  - границя міцності матеріалу на розтягання;  $\sigma_i$  - величини поточних напружень.

Формула (2) показує, що досягнення граничного стану в матеріалі обумовлюється його здатністю чинити опір нормальним напруженням розтягу, тобто статичний аспект оцінки міцності припускає наявність процесу розвитку тріщин у матеріалі.

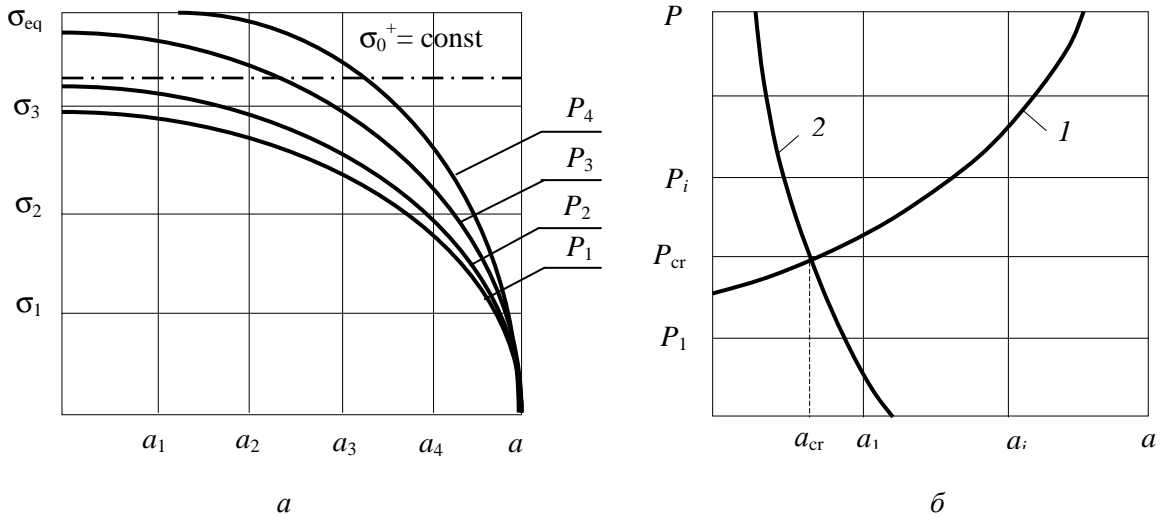
Опір бетону розтягання на порядок нижче, ніж стискання, тому напруження розтягу є визначальними в процесі мікротріщиноутворення, що призводить до виникнення та розвитку магістральних тріщин і руйнування елементів.

Таким чином, напружено деформований стан бетону розтягнутої зони характеризується його здатністю опиратися напруженням розтягу. У цьому випадку відбувається інтенсивне утворення тріщин, порушується структура бетону, що призводить до руйнування матеріалу без значного зростання зони пластичних деформацій. Тому в даному методі в розглядуваній області розвитку напружень розтягу стан бетону розглядається як крихкий, і при оцінці граничного стану допускається використання критеріїв крихкого руйнування та відповідних критеріїв міцності [9].

У запропонованому методі для визначення граничного стану матеріалу використовуються залежності розподілу еквівалентних напружень у розтягнутій зоні небезпечного перерізу елемента (рисунок, *а*) від лінійного розміру зони граничного стану  $a$  для кожного рівня навантаження ( $P_i$ ), які розглядаються, де  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Використовуючи статичний критерій міцності матеріалу (2), умова настання граничного стану представляється як залежність відповідної довжини зони передруйнування  $a_i$  від величин прикладеного навантаження  $P_i$  у небезпечному перерізі даного елемента конструкції, що розглядається (крива *1*, рисунок, *б*).

Наявність у реальному тілі гострокінцевих концентраторів напружень, зокрема дефектів типу тріщин, ускладнює розрахунок на міцність. Тому при визначенні гранично-рівноважного стану дефектного тіла разом із класичними критеріями міцності в даному підході використовуються умови, що враховують значення компонент напружено деформованого стану в околі кінчика тріщини.



Визначення граничного стану методом, який враховує основні критерії механіки руйнування: *а* - розподіл напружень у небезпечному перерізі елемента; *б* - залежності розміру зони передруйнування (*1*) і довжини тріщини (*2*) від значень зовнішніх навантажень  $P$ .

Найбільш широке розповсюдження в інженерних розрахунках будівельних конструкцій і матеріалів отримали силові критерії механіки руйнування, запропоновані [13], які базуються на використанні коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_i$ . Коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$ , як основна характеристика напружено-деформованого стану матеріалу в околі тріщини, в механіці руйнування є мірою сингулярності напружень навколо вершини тріщини, тобто області передруйнування [7].

При дослідженні роботи матеріалу в стадії зрушення тріщини в запропонованому методі використовується характеристика тріщиностійкості матеріалу - критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{Ic}$ . Цей коефіцієнт визначається розрахунком за значенням критичного напруження або навантаження, а також розмірами тріщини та поперечного перерізу зразка [8]. Для бетону критичний коефіцієнт інтенсивності напружень обчислюється шляхом здійснення випробувань бетонних зразків відповідно до ГОСТ 29167-91 [14].

Використана умова [13], як силовий критерій механіки руйнування, представляється у вигляді

$$K_I = f(p^*; a) \leq K_{Ic}, \quad (3)$$

де  $K_I$  - коефіцієнт інтенсивності напружень;  $K_{Ic}$  - критичний коефіцієнт інтенсивності напружень;  $p^*$  - граничні напруження в околі кінчика тріщини, викликані зовнішнім навантаженням;  $a$  - довжина тріщини.

На основі критерію (3) виводиться залежність параметричної довжини тріщини від граничних значень зовнішнього навантаження (крива 2, див. рисунок, б). Вона фіксує момент зрушення тріщини для даного виду матеріалу залежно від рівня навантаження та довжини тріщини й визначає гранично-рівноважний стан елемента на етапі руйнування.

Представляючи граничний стан тіла, як суму станів - напруженого стану в тілі без тріщини у вигляді функції (крива 1, див. рисунок, б) і гранично-рівноважного стану тіла з тріщиною у вигляді функції (крива 2, див. рисунок, б), запропонований метод дає змогу більш достовірно оцінити міцність елементів конструкцій і визначити її несучу здатність. Абсциса точки перетину кривих 1 і 2 (див. рисунок, б) характеризує критичний розмір зони граничного стану матеріалу, а її ордината – відповідне значення руйнівного навантаження.

Запропонований метод оцінки граничного стану деформованого тіла дає змогу поряд з класичним підходом розгляду статичних критеріїв міцності врахувати реальні властивості матеріалу елемента конструкції на стадії мікро- та макротріщиноутворення. Порівняння результатів оцінки граничного стану бетонних і залізобетонних конструкцій за різними методами [10, 11, 15] наведено в таблиці.

Види конструкцій	Значення критичного навантаження, кН		
	СНиП [2]	Запропонований метод	Експериментальні дані
Бетонна балка	10,3	13,0	13,2
Залізобетонна балка	14,5	20,4	21,8
Позацентрово-стиснута колона	$1,49 \cdot 10^3$	$1,97 \cdot 10^3$	-
Балка-стінка	-	$1,1 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$

Існуючі нормативні вимоги СНиП при оцінці граничних станів елементів бетонних і залізобетонних конструкцій є обов'язковими при проектуванні будівель і споруд. Перевірка заданого перерізу виконується за несучою здатністю (перша група граничних станів) і за деформаціями (друга група граничних станів) [2].

Перевірка за несучою здатністю виконується для кожного виду напруженого стану елементів конструкцій (за нормальними до поздовжньої осі поперечними перерізами різної форми при згинанні, при позацентровому стисканні та інших видах напруженого стану). Перевірка за другою групою граничних станів виконується переважно розрахунком щодо утворення тріщин нормальних і похилих до поздовжньої осі елемента.

Несуча здатність перерізу при розрахунку міцності визначається граничним станом стиснутої зони бетону й роботою арматури в розтягнутій зоні елемента. При розрахунку за деформаціями визначається ширина розкриття тріщин у розтягнутій зоні. Норми встанов-

люють граничні величини таких деформацій, які допустимі з точки зору забезпечення довготривалої роботи конструкції в експлуатаційних умовах.

Запропонований метод може використовуватися при проектуванні різних стержневих систем, плоских і просторових конструкцій із залізобетону, а також при оцінці граничних станів елементів конструкцій, що отримали пошкодження в процесі експлуатації. Крім того, використання методів механіки руйнування має суттєві переваги в тих випадках, коли нормативні методи граничних станів не можуть бути ефективно використані:

при наявності тріщин і початкових концентраторів напружень в елементах конструкцій;

при оцінці параметрів напруженого стану та деформування, які не регламентовано вимогами норм (граничні нахили споруд, граничні довжини тріщин у перерізі тощо);

при розрахунках тримірних і просторових конструкцій з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки та програмних комплексів.

У таких випадках використання методу механіки руйнування може бути рекомендовано в якості додаткових вимог або доповнення до діючих нормативних документів для бетонних і залізобетонних конструкцій.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии. – К.: Наук. думка, 1972. – 212 с.
2. СНиП 2.02.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: ЦИТП, 1989. – 80 с.
3. Litzner H.U. Design of Concrete Structures to ENV 1992. Eurocode 2. – Berlin, 1994/96. – 308 с.
4. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
5. Проектирование железобетонных конструкций: Справ. пособие / А. Б. Гольшев, В. Я. Бачинский, В. П. Полищук и др. Под ред. А. Б. Гольшева. – К.: Будівельник, 1985. – 496 с.
6. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под ред. В. В. Панасюка – К.: Наук. думка, 1988.
7. Вычислительные методы в механике разрушения / Под ред. С. Атлури: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. – 392 с.
8. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2 т. – М.: Мир, 1990. – Т. 1. – 448 с.
9. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.
10. Богдан С.Ю. Экспериментальное определение критического коэффициента интенсивности напряжений для бетона и оценка несущей способности конструкций методом механики разрушения // Перша Всеукр. наук.-техн. конф. “Аварії на будівлях і спорудах та їх попередження”: Зб. матеріалів. – К., 1997. - С. 236 - 244.
11. Бородачев Н.М., Богдан С.Ю. Применение методов механики разрушения к расчету прочности конструкций объекта “Укрытие” // Будівельні конструкції. – 2000. - Вип. 52. - С. 45 - 53.
12. Богдан С.Ю., Хавкин А.К. Механика разрушения при анализе состояния трещин железобетонных конструкций // Будівельні конструкції. – 2005. - Вип. 52. - С. 77 - 80.
13. Irwin G.R. Fractural mechanics. Structural Mechanics / Edit. J. N. Goodier, N. J. Yoff. - Oxford: Pergamon Press, 1960. – 557 p.
14. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении / Госком. СССР по строительству и инвестициям. - М.: Изд-во стандартов, 1992. – 18 с.
15. Богдан С.Ю. Применение метода механики разрушения к расчету несущей способности изгибаемых железобетонных элементов // Проблеми Чорнобиля. - 2000. – Вип. 6. - С. 205 - 209.

Надійшла до редакції 22.03.05,  
після доопрацювання – 04.04.05.

**21 10 К ОБОСНОВАНИЮ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ**

**С. Ю. Богдан**

Предложен метод к оценке предельного состояния бетонных и железобетонных конструкций с применением методов механики разрушения. Показана перспективность данного направления исследований. Обосновывается необходимость учета данного метода в нормативных документах при оценке предельных состояний бетонных и железобетонных конструкций, имеющих эксплуатационные дефекты.

**21 10 TO SUBSTANTIATION OF NORMATIVE REQUIREMENTS FOR ASSESSMENT OF ULTIMATE STATES OF THE CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES APPLYING FRACTURE MECHANICS METHODS**

**S. Yu. Bogdan**

The approach to assessment of ultimate state of the concrete and reinforced concrete structures applying fracture mechanics methods was suggested. It is demonstrated a prospect of this direction of researches. The necessity of the approach considering in normative documents for assessment of ultimate states of the concrete and reinforced concrete structures having operational damages was substantiated.