

# ШТУЧНІ ТА ПІДЗЕМНІ ТРАНСПОРТНІ СПОРТУДИ

УДК 624.21.059.1

Янчук Л.Л.

## МОДЕЛЬ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ЗА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ У ФУНКЦІЇ ЧАСУ

**Анотація.** У статті наведено модель оцінки надійності залізобетонних елементів автодорожнього моста за другим граничним станом. За критерій граничного стану в моделі прийнята ширина розкриття тріщин.

**Ключові слова:** міст, тріщиностійкість, критерій граничного стану, надійність, характеристика безпеки, гранична ширина розкриття тріщин

**Аннотация.** В статье представлено модель оценки надежности железобетонных элементов автодорожного моста по второму предельному состоянию. Критерием предельного состояния в модели принята ширина раскрытия трещин.

**Ключевые слова:** мост, трещиностойкость, критерий предельного состояния, надежность, характеристика безопасности, предельная ширина раскрытия трещин.

**Abstract.** The paper presents a model for evaluating the reinforced concrete elements reliability of the road bridge according to the second limit state. Limit state criteria in the model adopted by the width of the cracks.

**Keywords:** bridge, crack, limit state criteria, reliability, safety index, the maximum width of the cracks.

## Проблема

Сьогодні інженери системи експлуатації стурбовані технічним станом автодорожніх мостів. Останнім часом стрімко зростає кількість морально та фізично застарілих мостів, проектний термін служби яких мав би становити 70 – 100 років. тоді як фактичний середній термін служби автодорожніх мостів є всього лиш 45 – 50 років. Привертає увагу факт накопичення обсягів ремонтних робіт, які не були виконані в минулі роки. Кількість мостів, які потребують капітального ремонту або реконструкції, останні роки загрозовано збільшується.

Так за останні 10 років їх кількість зросла майже у п'ять разів, з 428 од. в 2004 р. до 2045 од. в 2013 р. Станом на 1.01.2012 кількість автодорожніх мостів, підпорядкованих Укравтодору, що терміново потребують ремонту або реконструкції становила 1957 од. (загальною довжиною 53,3 тис. пог.м) – 11,5% від загального числа, а на 1.01.2014 їх кількість збільшилась до 12,7% від загальної кількості.

Вартість ремонту і реконструкції цих мостів, за оцінкою експертів, складає вже близько 18 млрд. грн. Очевидно, що таких асигнувань у найближчі роки не буде виділено і кількість мостів, що потребують ремонту буде і далі збільшуватись.

З іншого боку, незадовільний технічний стан автодорожніх мостів України провокує значні соціальні і матеріальні збитки, що в свою чергу потребує збільшення асигнувань. В той же час, постановою Кабінету міністрів України від 17.09.2014 р. № 490 внесено зміни до «Правил дорожнього руху», затверджених в 2001 р. За цими змінами загальна маса транспортних засобів і їх складових, що рухаються в загальному транспортному потоці без спеціального дозволу служби експлуатації, збільшена з 38т до 40т і до 44т для контейнеровозів (до 46т на деяких окремих трасах, встановлених Укравтодором).

В цих умовах є нагальна потреба в науково обґрунтованих, близьких до реальних об'єктів, моделях оцінки надійності елементів мостів, особливо при навантаженнях більших ніж встановлені нормами. Один із можливих підходів розробки такої моделі, основаної на аналізі тріщиноутворення, наводиться в цій статті.

## Мета дослідження

Метою представленого дослідження є розбудова моделі оцінки надійності згинаних залізобетонних елементів мостів протягом життєвого циклу експлуатації згинаних залізобетонних елементах прогонових будов мостів. Критерієм технічного стану елемента в моделі виступає ширина розкриття тріщин. Дослідження базується на такій науковій гіпотезі: *ширина розкриття нормальних тріщин в згинаних залізобетонних елементах мостів є достатньою мірою для побудови моделі оцінки надійності елемента в процесі експлуатації.*

## Формулювання задачі дослідження

Сьогодні є загально визнаним, що тріщиноутворення і послідуєчне сколювання захисного шару є головними факторами, якими визначаються в процесі експлуатації залізобетонних елементів, довговічність, надійність та несна здатність.

В процесі експлуатації тріщини викликають в елементах «ефект доміно»: в зоні тріщини корозія арматури стає інтенсивнішою, продукти корозії породжують тиск на захисний шар, сколюється захисний шар, розширюється тріщина, зростає корозія – і коло замкнулось. Причому, інтенсивність процесу деградації зростає нелінійно [3, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Сьогодні відомо десятки залежностей прогнозу ширини розкриття тріщин ненапруженого і попередньо-напруженого залізобетону. Так тільки в огляді робот [12] наведено 32 формули визначення ширини поперечних тріщин в згинаних елементах.

В нормативних документах проектування залізобетонних елементів країн світу для контролю ширини розкриття тріщин застосовується п'ять – шість залежностей. Найбільш відомими з них є модель СЕВ-FIP Model Code 1990 [11], яка прийнята в Єврокодi 2 та модель Р.Фроша (R.J. Frosch) [15] – в нормативах США [17].

У вітчизняній методології аналізу тріщиностійкості панує теорія В.І. Мурашова [3], яка для нас є нормативною в розрахунку залізобетонних елементів [1].

При всьому різноманітті моделей визначення ширини розкриття нормальних тріщин та відстані між ними в згинаних елементах їх об'єднує загальна фундаментальна наукова ідея – саме процес тріщиноутворення найбільш повно відображає деформаційні властивості залізобетонного елемента. Тому всі відомі моделі тріщиноутворення мають за параметри розрахунку кількість арматури в перерізі елемента, її розрахунковий опір та модуль пружності, параметри розташування арматури в перерізі, механічні характеристики бетону.

В останні 10 – 15 років все більше науковців звертаються до моделі тріщиноутворення в залізобетоні для оцінки ресурсу елемента. Так, наприклад, в роботах [4, 5, 12, 13, 14] переконливо доводиться, що вичерпання несної здатності строго зв'язано з шириною розкриття тріщин. Підтвердження цього тезису є також і в дослідженнях українських науковців [7, 8, 9].

В дослідженні, основні положення якого представлені нижче, саме такий новітній підхід використовується для побудови моделі оцінки надійності згинаних залізобетонних елементів автодорожніх мостів.

Центральна наукова ідея дослідження полягає в теоретичному пошуку зв'язку ширини розкриття тріщин з надійністю. Задача розбудови моделі надійності елемента за тріщиностійкістю в функції часу експлуатації формулюється як пошук ймовірності не перевищення граничного стану:

$$P(t) = P\{ a_{cr} - A(t) \geq 0 \}, \quad (1)$$

де  $a_{cr}$  – критична ширина розкриття тріщин;

$A(t)$  – функція життєвого циклу залізобетонного елемента за тріщиностійкістю.

Умовою граничного стану є  $a_t \leq a_{cr}$  де  $a_t$  – поточна ширина розкриття тріщин від заданих постійних і тимчасових навантажень.

### **Модель надійності**

Прийmemo усталену гіпотезу про нормальний розподіл функції розкриття тріщин протягом життєвого циклу експлуатації  $A(t)$  і запишемо ймовірність не перевищення граничного стану (1) у вигляді:

$$P(t) = \Phi[\beta(t)], \quad (2)$$

де  $\Phi$  – нормальна функція розподілу;

$\beta(t)$  – характеристики безпеки виражена через параметри функції життєвого циклу залізобетонного елемента за тріщиностійкістю.

Характеристику безпеки запишемо через параметри тріщиноутворення в класичній формі [6]:

$$\beta(t) = [\mu_{cr} - \mu_a(t)] / [\sigma_{cr}^2 + \sigma_a(t)^2]^{0.5}, \quad (3)$$

де  $\mu_{cr}$  – середнє значення критичної ширини розкриття тріщин;

$\mu_a(t)$  – середнє значення ширини розкриття тріщин на час  $t = \tau$ ;

$\sigma_{cr}$  – середньоквадратичне відхилення критичної ширини розкриття тріщин;

$\sigma_a(t)$  – середньоквадратичне відхилення ширини розкриття тріщин на час  $t = \tau$ .

Для визначення поточного середнього значення ширини розкриття тріщин на час  $t = \tau$  скористаємося розробленою нами моделлю життєвого циклу [8]:

$$A(t) = a \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot m_5 \cdot s \cdot t^2, \quad (4)$$

де  $s$  – розмірний коефіцієнт, має розмірність  $1/t^2$  (за одиницю часу тут прийнято рік);

$m_1$  – залежить від типу армування (приймають залежно від категорії тріщиноутворення);

$m_2$  – визначають залежно від проектного класу бетону;

$m_3$  – визначають залежно від типу конструкції (збірна, збірно-монолітна і монолітна);

$m_4$  – визначають залежно від умов експлуатації;

$m_5$  – коефіцієнт розкриття тріщин, який визначають залежно від класу навантаження;

$a$  – функція ширини розкриття тріщин, що в загальному випадку має вид:

$$a = f_a(R, \sigma, E, \psi), \quad (5)$$

де  $(R, \sigma, E, \psi)$  – розрахункові параметри тріщиноутворення, згідно [2].

Модель життєвого циклу (4) для зручності письма запишемо у вигляді:

$$A(t) = a \cdot f(t), \quad (6)$$

де  $f(t)$  – безрозмірна функція-індикатор деградації залізобетонного елемента

$$f(t) = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot m_5 \cdot s \cdot t^2. \quad (7)$$

Середнє значення ширини розкриття тріщин  $\mu_a(t)$  (математичне очікування) визначимо з детерміністичного за моделлю (6) як статистично модельоване [18]:

$$\mu_a(t) = A(t) / (1 - kV_a), \quad (8)$$

де  $k$  – коефіцієнт забезпеченості,  $k = 0,05$ ;

$V_a$  – коефіцієнт варіації ширини розкриття тріщин елемента, що визначається за коефіцієнтами варіації арматури  $V_A$  та бетону  $V_C$

$$V_a = (V_A^2 + V_C^2)^{0,5}. \quad (9)$$

Середнє значення критичної ширини розкриття тріщин  $\mu_{cr}$  (математичне очікування) визначається із заданого детерміністичного також як статистично модельоване:

$$\mu_a(t) = a_{cr} / (1 + kV_a), \quad (10)$$

де  $a_{cr}$  – задана критична (гранична) ширина розкриття тріщин.

Середньоквадратичне відхилення критичної ширини розкриття тріщин визначається загальною формулою математичної статистики:

$$\sigma_{ск} = (K_{\text{вык}}^2 M_C^2 + K_A^2 M_A^2)^{0,65} \text{ ю} \quad (11)$$

Аналогічно визначається середньоквадратичне відхилення ширини розкриття тріщин на час  $t = \tau$ :

$$\sigma_a(t) = [(R_{ser}^2 V_C^2 + R_A^2 V_A^2) f(t)]^{0,5}. \quad (12)$$

де  $R_{ser}, R_A$  – характеристичні опори бетону і арматури;

$V_C, V_A$  – коефіцієнт варіації стисненого бетону і коефіцієнт варіації розтягнутої арматури;

$f(t)$  – функція-індикатор деградації залізобетонного елемента.

$$\beta(t) = \frac{\left( \frac{a_{cr}}{1 + kV_a} - \frac{ar \cdot (m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot m_5)^{-1} \cdot s \cdot t^2}{1 - kV_a} \right)}{\sqrt{(R_{SER}^2 \cdot V_C^2 + R_A^2 \cdot V_A^2) + (R_{SER}^2 \cdot V_C^2 + R_A^2 \cdot V_A^2) \cdot (m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot m_5)^{-1} \cdot s \cdot t^2}} \quad (13)$$

Таким чином, модель (3), в якій характеристика безпеки виражена через звичні для інженера параметри поперечного перерізу залізобетонного елемента, дає можливість обчислити надійність елемента за другою групою граничних станів. Початковими даними для моделі є обчислена ширина розкриття тріщин від постійних і тимчасових навантажень. Числовий аналіз надійності елемента за тріщиностійкістю в функції часу експлуатації за формулою (13) показав, що надійність варіюється в межах  $\beta(t) = 4,2 \dots 1,5$  в залежності від параметрів матеріалу  $R_{ser}, R_A, V_C, V_A, m_i$  та критичної ширини розкриття тріщин  $a_{cr} = 0,01 \dots 0,03$  см.

Дещо проблематичним сьогодні є призначення граничної для експлуатації величини ширини розкриття тріщин  $a_{cr}$ . Нижче приводяться наш пропозиції придатні для практичних розрахунків.

Зауважимо, оцінка надійності за першою групою граничних станів в цьому випадку (за нормативним документом системи експлуатації ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [2], наприклад) нічого загрозливого не показує. Цей факт і був спонукальним мотивом для розробки моделі оцінки надійності за параметром тріщиностійкості. Такий контроль, як показують тестові розрахунки, для випадку малих прольотів ( $L \leq 18$ м), може виявити недопустиме зниження надійності, особливо в випадках 3 - 4 експлуатаційних станів за оцінкою

стандарту [2] (Граничне значенні характеристики безпеки за вимогами тріщиностійкості  $\beta_{cr}=1,0$ ).

### Критична ширина розкриття тріщин

Прийнята в формулюванні моделі надійності (1) критична ширина розкриття тріщин  $a_{cr}$  є умовою досягнення граничного стану за тріщиностійкістю. Встановлення обґрунтованих достовірних значень цієї величини є принциповим моментом в моделі. Нам не відомі вітчизняні дослідження такого плану. Проте є немало зарубіжних в яких теоретично і лабораторно встановлюються допустимі в експлуатації граничні значення  $a_{cr}$  [11, 16]. В табл.1, що наводиться нижче, пропонуються для практичних розрахунків граничні значення ширини розкриття тріщин залізобетонних елементів в різних умовах оточуючого середовища, за даними досліджень Американського інституту бетону (АСІ).

**Таблиця 1** – Граничні значення ширини розкриття тріщин за документом АСІ 224R.90 [16]

Умови експлуатації	Гранична ширина розкриття тріщин, мм
Конструктивний захист від попадання вологи, сухе повітря або наявність захисного покриття	0,41
Періодичне змочування, вологе повітря, контакт з ґрунтом	0,30
Загроза попадання морської вологи	0,25
Загроза хімічного впливу	0,18

В українському документі системи експлуатації автодорожніх мостів ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [2] також наводиться критична ширина розкриття тріщин для 5-го експлуатаційного стану:  $a_{cr} = 0,4$  мм незалежно від умов експлуатації. Проте диференціації критичної ширини розкриття тріщин в залежності від умов експлуатації в нормативному документі [2] немає.

### Висновки

1. Розроблена модель оцінки надійності залізобетонних елементів автодорожнього моста за другим граничним станом в функції часу може стати ефективним апаратом управління технічним станом мостів, що знаходяться в експлуатації.



2. Модель, що пропонується можна прийняти альтернативною в системі експлуатації як найбільш обґрунтованою, з точки зору фізики руйнування залізобетону, базою для прогнозування ресурсу споруди на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з етапу проектування.

3. Очевидно, що наша модель оцінки надійності може бути використана для теоретичного обґрунтування критичних значень ширини розкриття тріщин і встановлення оцінок зносу згинаних залізобетонних елементів мостів за вимогами тріщиностійкості в нормативному документі системи експлуатації ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [2].

Ця робота виконана під керівництвом д-ра техн. наук, професора Лантуха-Лященко А.І. Висловлюю йому мою щирю подяку.

### Література

1. Державний стандарт України ДБН В.2.3-14: 2006. Мости і труби. Правила проектування. – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства, 2006. – 359 с.
2. Державний стандарт України ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів». – К.: Мінрегіон України, 2012.
3. Мурашов В.И. Трещиностойкость. Жесткость и прочность железобетона. – М.: Машстройиздат, 1950.
4. Пирадов А.Б., Гвелесиани Л.О., Пирадов К.А. Длина и ширина раскрытия трещин в бетонных элементах при длительном нагружении // Известия вузов. Строительство. – 1991. – № 12. – С.88 – 90.
5. Пирадов К.А., Гузев Е.А. Механика разрушения железобетона. – М., 1998.
6. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат. – 1978. – 239 с.
7. Янчук Л.Л. Ймовірнісна модель прогнозу ресурсу елементів мостів [Текст] /Л. Л. Янчук// Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2010. – С.150-155.
8. Янчук Л.Л. Обґрунтування моделі прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу. [Текст] /Л.Л.Янчук// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2010. – № 664. – С. 365-371.
9. Яцко Ф.В. Довговічність захисного шару залізобетонних елементів мостів // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. Вип.33. – Вид-во ДНУЗТ, 2010. – С. 190 -196.
10. Borosnyoi A., Balazs G. L. Models for flexural cracking in concrete: the state of the art. Structural Concrete, 2005, 6, No. 2, 53-62.
11. Comite Euro-Internationale du Beton. CEB-FIP Model Code 1990. 1993 CEB Bulletin d'Information No. 213/214.
12. Li Chun Q. Time Dependent Reliability Analysis of the Corrosion Affected Concrete Structures. International Journal of Material & Structurale Reliability Vol.3, No 2, 2005. – P. 105 – 116.
13. Qing, L.C., Melchers, R.E. Time-dependent reliability analysis of corrosion-induced concrete cracking. ACI Structure Journal, V.No.4. 2005. – P. 543 – 549.
14. Rao, S. V. K. M. and Dilger, W. H. Control of flexural crack width in cracked prestressed concrete members. ACI Structural Journal, No.2, 1992. – P. 127–138.
15. Frosch, R. J. “Flexural Crack Control in Reinforced Concrete,” ACI Special Publication. V. 204, 2001. – P. 135-154.
16. ACI 224R-90, “Control of Cracking in Concrete Structures,” ACIA 4 anual of Concrete Practice, Part 3, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1992.
17. “AASHTO LRFD Bridge Design Specifications”. 2008. American Association of State Highway and Transportation Officials.
18. ISO 2394. General principles on reliability for structures. - European Committee for Standardization. Brussels, 1998. – 62 p.