УДК: 624.21.059.1 **DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.151.2015.68661**

МОДЕЛЮВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Магістр Л.Л. Янчук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛАЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МОСТОВ

МагистрЛ.Л. Янчук

LIFE CYCLE MODELING OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OPERATED BRIDGES

MasterL.L. Ianchuk

Представлена модель прогнозу залишкового ресурсу згинаних залізобетонних елементів мостів, що знаходяться в експлуатації. Теоретичною базою моделі є аналіз тріщиностійкості елемента. Модель представлена в детерміністичній та ймовірнісній постановці, пропонується для практичного використання в системі експлуатації автодорожніх мостів.

Ключові слова:*гранична ширина розкриття тріщин, прогноз ресурсу,ресурс залізобетонних елементів,характеристика безпеки.*

Представлена модель прогноза остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов эксплуатируемых мостов. Теоретической базой модели является анализ трещиностойкости элемента. Модель представлена в детерминистической и вероятностной постановке, предлагается для практического использования в системе эксплуатации автодорожных мостов.

Ключевые слова: *предельная ширина раскрытия трещин, прогноз ресурса, ресурс железобетонных элементов, характеристика безопасности.*

This paper presents prediction model of residual life of concrete elements operated bridges. The focus of this paper is on the deterioration models of the bridge elements. Theoretical basis of the model is the analysis of crack resistance of the element.

The deterministic model developed here for residual life assessment in the management of highway bridges designed. They can characterized with the following facilities:assessment condition of bridge elements; prediction condition of elements over the operating time;prediction residual service-life of elements.

The possibility stochastic interpretation of degradation model is considered. Probabilistic aspects of the uncertainty modeling and prediction of bridge service life presented by special formula reliability index a time-dependent operation.For the purpose of the bridge maintenance,this model should give quantitative criteria of integrated estimation and prediction of condition assessment an element while in service.

Keywords*: maximum width of the cracks, prediction of the resource, the resource of reinforced concrete elements, safety index.*

Вступ. Сьогодні констатується суттєве погіршення стану автодорожньої мережі України в цілому, особливо мостів. Кількість мостів що потребують ремонту збільшується загрозливими темпами.

В умовах вкрай обмеженого фінансування системи експлуатації споруд, стратегічне планування видатків на їх утримання має опиратися на реалістичний прогноз ресурсу залізобетонних елементів. Саме моделі життєвого циклу мають забезпечити фінансування експлуатації споруд так, щоби протягом терміну служби зберегти параметри функціональності, надійність, безпеку експлуатації, зберегти оточуюче середовище, архітектурні, естетичні і історичні цінності споруди.

Огляд публікацій. Сьогодні проблема управління життєвим циклом елементів споруд стає пріоритетною для багатьох країн світу. Незважаючи на безумовну актуальність проблеми, публікацій в Україні мало. Теоретичні дослідження з проблем надійності, довговічності та прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів знаходимо в публікаціях українських науковців Давиденко О.О., ДехтяряА.С., Лантуха-Лященко А.І., Янчук Л.Л., Яцко Ф.В. [2, 3, 5, 7,8].

В країнах Європи та США ця проблема розглядається як нагальна в розробці теоретичних засад системи експлуатації споруд, тому публікацій є багато. Серед численних закордонних публікацій назвемо декілька, найбільш відомих, що відносяться до прогнозу технічного стану за параметрами тріщиноутворення.

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 CEB-FIPModelCode 1990 [11], яка прийнята в Еврокоді 2 та модель Р.Фроша

(R.J. Frosch) [12] – в нормативах США [9].У вітчизняній методології аналізу тріщиностійкості панує теорія В.І. Мурашова [6], яка для нас є нормативною в розрахунку залізобетонних елементів мостів.

Мета дослідження. Центральною метою представленого дослідження є задача оцінки ресурсу згинаних залізобетонних елементів мостів протягом життєвого циклу експлуатації. Ця задача реалізується шляхом використання фундаментальних залежностей моделі тріщиноутворення в елементах мостів, прийнятою в проектуванні мостів.

Формулювання задачі дослідження. Дослідження базується на такій гіпотезі: ширина розкриття поперечних тріщин в згинаних залізобетонних елементах мостів є достатньою мірою для побудови практичної моделі деградації елемента в процесі експлуатації.

Ця гіпотеза дає можливість розробки моделі прогнозу ресурсу елемента в функції одного параметра – ширини розкриття тріщин:

$$A(t) = a \cdot f(t), \tag{1}$$

де a – функція ширини розкриття тріщин, що взагальному випадку має вид:

$$a = f_a(R, \sigma, E, \psi), \tag{2}$$

де (R, σ, E, ψ) - розрахункові параметри тріщиноутворення, згідно [6];

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

Детерміністична модель життєвого циклу**. Приймемо функцію індикатора деградації залізобетонного елементу в такій формі:**

$$f(t) = m \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot s \cdot t_2 \tag{3}$$

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

m_1 – коефіцієнт умов експлуатації; m_2 - коефіцієнт типу конструкції;

m– коефіцієнт - функція оточуючого середовища,

$m = m(p_1,p_2,p_3)$. Тут p_i - параметри, що характеризують оточуюче середовище (розмах середніх *max* та *min* температур, відносна вологість навколишнього середовища, наявність хлоридів).

Це безрозмірна функція, що задає закон росту ширини тріщини протягом життєвого циклу експлуатації в залежності від співвідношення розрахункової початкової ширини розкриття тріщини при $t = 0$ – a_dта на фіксований час в майбутньому $t = \tau - a_\tau$. З урахуванням (3) модель життєвого циклу залізобетонного елемента має вид:

$$A(t) = am \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot s \cdot t_2 \tag{4}$$

З рівняння (4) отримаємо час досягнення граничної деградації, поклавши $A(t) = a_{cr}$, де a_{cr} - граничне значення ширини розкриття тріщин в експлуатації:

$$T = \left(\frac{a_{cr}}{a_d \, m \, m_1 m_2 \, s} \right)^{0.5}, \tag{5}$$

де T - термін служби елемента, що прогнозується.

Коефіцієнти моделі (4) приймають такі значення: m = 1,0 … 1,4; m_1 = 1,0 … 1,3; m_2 = 1,0 … 1,2. Обґрунтування значень коефіцієнтів моделі наведено в роботі [7].

В прогнозуванні ресурсу елемента за залежністю (5) принциповим моментом є встановлення критичного значення ширини розкриття тріщин $a_\tau = a_{cr}$ в процесі експлуатації. В нашій моделі це значення прийнято відповідно рекомендаціям українського нормативного документу системи експлуатації автодорожніх мостів ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [4].

В табл.1 наведені узагальнені значення параметрів, що характеризують життєвий цикл згинаних залізобетонних елементів за експлуатаційним станам. Для проектної оцінки ресурсу використовуються експлуатаційні параметри 5-го стану (непрацездатний): характеристика безпеки β = 1,7; знос 60%; критична ширина розкриття тріщин a_{cr} = 0,04 см.

Зауважимо, що прийняті в документі ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [4] критичні значення зносу і ширини розкриття тріщин не є теоретично обоснованими, вони прийняті на основі багаторічного досвіду експлуатації автодорожніх мостів. Тому в

нашій моделі ці дані розглядаються як перше наближення.

Таблиця 1

Параметри деградації залізобетонних елементів

Експлуатаційний стан	Характеристика безпеки β	Знос елемента, %	Гранична ширина тріщин, см
Стан 1	3,8	0-3	0,01
Стан 2	3,0	4-8	0,02
Стан 3	2,4	9-27	0,02
Стан 4	2,1	28-42	0,03
Стан 5	1,7	≥43	0,04

Вид функції життєвого циклу залізобетонного елемента при $m = m_1 = m_2 = 1$та a_{cr}= 0.03 см показано на рис.1(крива $A(t)$. Як видно з графіка, проектний ресурс елемента в цьому випадку складає 100 років. Рівність всіх коефіцієнтів моделі$m_i = 1$ тут означає, що виконуються вчасно всі ремонтні роботи встановлені нормами експлуатації , елемент знаходиться в сприятливих умовах зовнішнього середовища, має довговічний тип перерізу.

Прогноз довговічності при умові коли відсутня систематична експлуатація, дуже жорстких умов оточуючого середовища, малої довговічності поперечного перерізу (при максимальних значеннях коефіцієнтів та розрахунковій початковій ширині розкриття тріщини при $t = 0$ $a_d = 0{,}03$) показаний на графіку рис.1 функцією $A1(t)$. Тобто, це випадок коли модель дає мінімальні значення прогнозу часу життєвого циклу $T = T_{min}$. Ресурс елемента в цьому випадку складає $T = 76$ років.

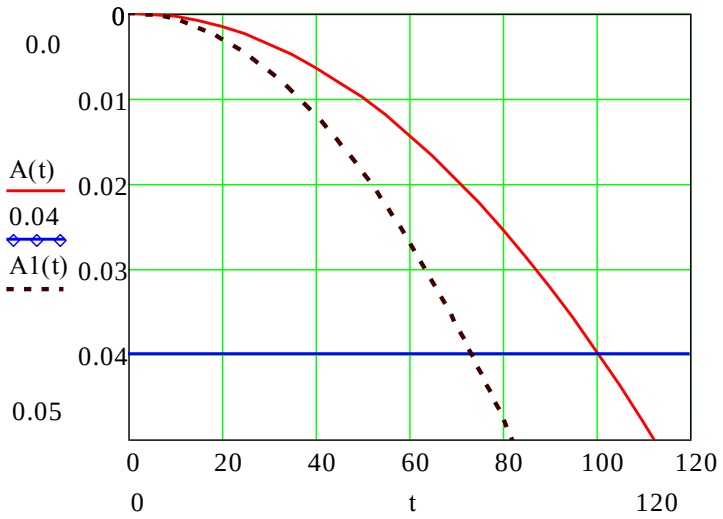

Рис. 1. Функції прогнозу життєвого циклу в експлуатації.

Адекватність моделі перевірялась за допомогою історичних даних системи експлуатації автодорожніх мостів АЕСУМ [1]. Прогнозування залишкового ресурсу за представленою моделлю має практично достатню збіжність з натурними даними.

Ймовірнісні аспекти моделі. Ставиться задача оцінки надійності елемента за тріщиностійкістю в функції часу експлуатації. Умовою граничного стану є $a_\tau = a_{cr}$. Потребується знайти надійність

$$P(t) = \mathrm{P}\{a_{cr} - A(t) \geq 0\}, \tag{6}$$

де a_{cr}- критична ширина розкриття тріщин; $A(t)$ – функція життєвого циклу залізобетонного елемента (4).

Приймемо усталену гіпотезу про нормальний розподіл ширини розкриття тріщин і запишемо вираз характеристики безпеки в класичнійформі відповідно визначення надійності за виразом (6)

$$\beta(t)=\frac{\mu_{cr}-\mu_a(t)}{\left(\sigma_{cr}^2+\sigma_a(t)^2\right)^{0.5}}, \qquad (7)$$

де μ_{cr}-середнє значення критичної ширини розкриття тріщин; $\mu_a(t)$ - середнє значення ширини розкриття тріщин на час $t=\tau$;σ_{cr}– середньоквадратичне відхилення критичної ширини розкриття тріщин;$\sigma_a(t)$ - середньоквадратичне відхилення ширини розкриття тріщин на час $t=\tau$.

Середньоквадратичне відхилення критичної ширини розкриття тріщин визначається загальною формулюоматематичної статистики

$$\sigma_{cr} = (R_{ser}^2 V_C^2 + R_A^2 V_A^2)^{0,5} \qquad (8)$$

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

$$\sigma_a(t) = [(R_{ser}^2 V_C^2 + R_A^2 V_A^2)\, f(t)]^{0,5} \qquad (9)$$

Тут 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 елементу.

Числовий аналіз надійності елемента за тріщиностійкістю в функції часу експлуатації за формулою (7) показав, що надійність варіюється в межах .$\beta(t)$ = 4,2 … 1,5 в залежності від параметрів матеріалу R_{ser}, R_A,V_C, V_A, m_iта критичної ширини розкриття тріщин a_{cr} = 0,01 … 0,03 см. Отримані дані порівнювались з результатами статистичного експерименту за методом Монте-Карло. Виявлена хороша збіжність визначення характеристики безпеки за формулою (7) та за статистичним моделюванням.

Висновки.

1. Виконане дослідження дає підставу стверджувати, що аналіз тріщиностійкості згинаних залізобетонних елементів мостів може стати найбільш обґрунтованою, з точки зору фізики руйнування залізобетону, базою для розробки простих інженерних моделей прогнозування ресурсу.

2. Принципово важливою стороною моделі є її універсальність відносно часу життєвого циклу. Модель може бути застосованою для прогнозу ресурсу якдля оцінки залишкового ресурсу в системі експлуатації мостів так і на етапі проектування.

3. Встановлений нами в рамках запропонованої моделі зв'язок з нормативним документом експлуатації автодорожніх мостів [4] відкриває шлях, до паралельного з цим нормативом, прогнозування залишкового ресурсу згинаних залізобетонних елементів.

Очевидно, що в науковому плані наша модель життєвого циклу може слугувати базисом для теоретичного обґрунтування критичних значень ширини розкриття тріщин і встановлення оцінок зносу згинаних залізобетонних елементів мостів, що знаходяться в експлуатації.

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

Список використаних джерел

1. БоднарЛ.П. Управлінняутриманнямелементівзалізобетоннихмостівнаосновімоделейнечіткоїлогіки // ВісникДніпропетровськогонаціональногоуніверситетузалізничноготранспортуіменіакадеміка В. Лазаряна. – Д.: Вид-воДніпропетр. нац. ун-тузалізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – Вип.33. - С. 39-42.

2. Давиденко О.О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону», №78, том 2, Київ 2013. – с.225 – 235

3. Дехтяр А.С. Планування експлуатації залізобетонних мостів // Наук. праці семінару "Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій". - Луцьк, 16-19 вересня 2002 р.

4. ДСТУ-Н Б.В.1.3-23:2013 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів». - Мінрегіон України, К.: 2013.

5. Лантух-Лященко А.І. Нормативне регулювання у сфері проектування і експлуатації мостів. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Вып.58, Харьков, изд. ХНАДУ: 2012.- С. 7 – 15.

6. Мурашов В.И. Трещиностойкость. Жесткость и прочность железобетона, Машстройиздат, М.: 1950.

7. Янчук Л.Л. Обґрунтування моделі прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу. [Текст] /Л.Л.Янчук//. Вісник Національного університету «Львівська політехніка», № 664, Львів: 2010, с.365-371

8. 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

9. "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications". 2008. American Association of State Highway and Transportation Officials.

10. ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI. 2008

11. Comite Euro-Internationale du Beton. CEB-FIP Model Code 1990. 1993 CEB Bulletin d'Information No. 213/214.

12. Frosch, R. J. "Flexural Crack Control in Reinforced Concrete," ACI Special Publication. V. 204, 2001. pp. 135-154.

Рецензент д-р техн. наук, професор Дехтяр А.

Янчук Леонід Леонідович, магістр, ассистент кафедри «Мости та тунелі», Національний транспортний університет. Тел. (044)2807978. E-mail: leonid.ianchuk@gmail.ru

Yanchuk Leonid Leonidovich, magister,assistant of the department "bridges and tunnels", National Transport University. Tel. (044) 2807978. E-mail: leonid.ianchuk@gmail.ru