

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОГНОЗУ РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ

© Лантух-Лященко А.І, 2010

Подано теоретичні засади моделювання життєвого циклу залізобетонних елементів мостів. Показано дві моделі деградації: детерміністична і стохастична. Розглянуто можливості наведених моделей.

Ключові слова: життєвий цикл, прогноз життєвого циклу, залізобетонний елемент, міст.

This paper presents an approach to the service life modelling of bridges reinforced concrete elements. Two degradation models are presented: deterministic and stochastic. The possibility of the proposed model is discussed.

Keywords: service life, service life prediction, reinforced concrete element, bridge.

Проблема. Проблема оцінки і прогнозу безпечного терміну експлуатації залізобетонних мостів, з якою стикаються всі країни, для України є особливо вагомою через цілу низку несприятливих причин. Назвемо головні з них: складний економічний та фінансовий стан; майже останнє місце в Європі за розвитком дорожньої мережі; малий термін служби залізобетонних прогонових будов мостів, відсутність системи експлуатації. У своїй передмові до збірки “Проблеми ресурсу” [14] академік НАН України Б.Є. Патон пише: “...особливої актуальності набувають питання управління експлуатаційною надійністю та довговічністю відповідальних об’єктів шляхом визначення їх технічного стану і залишкового ресурсу та встановлення науково обґрунтованих строків експлуатації”.

Вважається, що довговічність залізобетонних мостів, запроектованих відповідно до чинних на час проектування нормативних вимог [16], має становити 100 років. Насправді сьогодні ми констатуємо, що середній термін служби залізобетонних прогонових будов мостів України не перевищує 45–50 років. Так, на дорогах державного значення в четвертому експлуатаційному стані

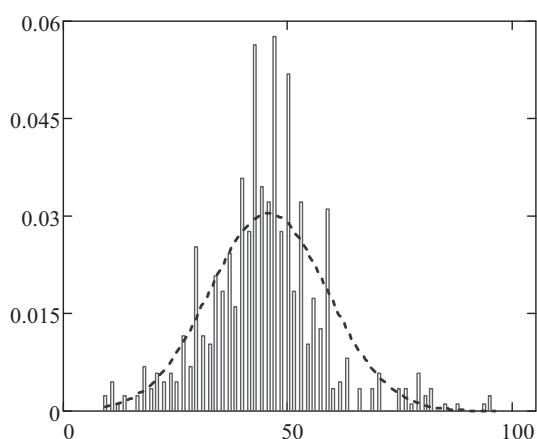


Рис. 1. Вік залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів на дорогах державного значення, що перебувають в четвертому експлуатаційному стані

перебуває майже 21 % залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів (рис. 1), їх середній вік становить 45 років. (Зауважимо, що 82 % автодорожніх мостів розміщені на місцевих дорогах і їх технічний стан дещо гірший.)

Зниження реального середнього терміну служби залізобетонних прогонових будов мостів до 50–60 років спостерігається також і в країнах Європи. В роботі [17] вказується, що середній час життєвого циклу залізобетонних мостів Японії встановлений Міністерством фінансів – 60 років.

В чому причина зниження очікуваного ресурсу? Для України ми одноставно називаємо, передусім, відсутність системи експлуатації та низьку якість будівництва.

Проте цього не можна сказати про країни Європи або Японію, де діє чітка система експлуатації мостів. Очевидно, що, окрім названих, є також інші об’єктивні причини. Ми вважаємо, що значною мірою зниження довговічності закладається ще на стадії вишукування і проектування споруди. Справді, в сучасному апараті проектування залізобетонних елементів (і не тільки мостів!) немає ніяких

важелів управління довговічністю. Термін життєвого циклу залізобетонних мостів призначається директивно, розрахункові залежності не мають змінної часу, проблема довговічності перебуває цілком у площині досвіду та інтуїції проектувальника.

Водночас проблема довговічності залізобетонних елементів є предметом вивчення величезної кількості науковців, зокрема і українських [3, 4, 6, 12]. Ми вважаємо, що сьогодні є нагальна потреба в об'єднанні наукового базису досліджень деградації залізобетону з вимогами правил проектування, умов будівництва й експлуатації та отримати теоретичні моделі оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів, які стали б основою розроблення практичного апарату управління життєвим циклом мостів.

Мета роботи. Цією роботою автор має намір привернути увагу науковців і проєктантів до проблеми прогнозу ресурсу залізобетонних елементів мостів на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування, і викласти два підходи до розв'язання задачі прогнозу довговічності: детерміністичний і стохастичний. Моделі прогнозу, що наводяться тут, аналізуються і розглядаються з погляду можливості їх застосування в практиці проектування залізобетонних елементів мостів.

Детерміністична модель життєвого циклу. Наукова ідея, на якій ґрунтується детерміністична модель життєвого циклу, що пропонується, полягає в такому: прогноз ресурсу залізобетонного елемента отримуємо як суму часу деградації захисного шару T_1 та часу корозії арматури до критичного рівня T_2

$$T = T_1 + T_2. \quad (1)$$

Інакше кажучи, модель прогнозу ресурсу складається з двох моделей: моделі деградації бетону T_1 захисного шару та моделі корозії арматури. При цьому приймається гіпотеза, що протягом часу деградації бетону захисного шару до критичного рівня арматура не кородує.

Модель деградації захисного шару бетону подамо загальними законами аналітичної теорії дифузії, відомими як рівняння першого і другого законів Адольфа Фіка [1]. Першим з них визначається час карбонізації T_c , другим – час насичення захисного шару хлоридами T_{cl} .

Процес карбонізації описується одновимірним диференціальним рівнянням першого закону Фіка:

$$Q = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

де Q – кількість перенесеної в результаті дифузії речовини (у цьому випадку – вуглецю), так звана щільність дифузійного потоку; $C = C(x, t)$ – концентрація речовини, що дифундує, функція координати x і часу t ; D – коефіцієнт дифузії газу в бетоні.

Розв'язок диференційного рівняння (2) відомий, він і є моделлю деградації захисного шару бетону в функції часу. Ми скористаємося розв'язком при допущеннях, що концентрація вуглецю лінійно змінюється по товщині захисного шару бетону та градієнт концентрації є постійним. Отримаємо глибину карбонізації в функції часу:

$$d_c = \left(\frac{2DCt}{m_0} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

де d_c – глибина карбонізації в напрямку координати x , нормальної до поверхні бетону; m_0 – реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні.

Модель деградації (карбонізації) захисного шару бетону (2), (3) є феноменологічною, її параметри D , m_0 визначаються експериментально [4, 15].

Час прогнозу повної карбонізації захисного шару визначається із залежності (3) при $d_c = a$:

$$T_c = \frac{a^2 m_0}{2D(c_s - c_i)}, \quad (4)$$

де a – товщина захисного шару; c_s – концентрація CO_2 на поверхні захисного шару бетону; c_i – початковий вміст CO_2 в бетоні.

Розв'язок (3) в документі [18] доповнено коефіцієнтами, що повніше відображають властивості бетону та умови експлуатації:

$$d_c = \left(\frac{2k_1 k_2 k_3 DCt}{m_0} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

де k_1 – параметр середнього вмісту вологи в бетоні; k_2 – параметр умов експлуатації; k_3 – коефіцієнт водоцементного відношення;

Деградація захисного шару бетону під впливом хлоридів характеризується руйнуванням пасивуючого шару арматури, коли біля її поверхні накопичується певна критична кількість хлоридів. Іони хлоридів, які завжди наявні у навколишньому середовищі, проникають через захисний шар по капілярній системі та по мікротріщинах. Процес дифузії хлоридів описується диференціальним рівнянням другого закону Фіка [0]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6)$$

де $C = C(x,t)$ – концентрація іонів хлориду на глибині x у час t ; D – коефіцієнт дифузії хлоридів у бетоні; t – час; x – координата, нормальна до поверхні бетону.

Рівняння (6) при граничних і початкових умовах $C(x,t) = C_S$ для $x = 0, t > 0$ і $C(x,t) = C_I$ для $x > 0, t = 0$ та постійному коефіцієнті дифузії хлоридів в бетоні має розв'язок:

$$C = C_I + (C_S - C_I) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right], \quad (7)$$

де $\operatorname{erf}()$ – функція помилок; C_I – початковий вміст хлоридів у бетоні; C_S – концентрація хлоридів на поверхні захисного шару бетону.

Розв'язок (7) встановлює зв'язок глибини проникнення хлоридів з часом:

$$t = \frac{1}{D} \left[\frac{x}{\left(2 \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C - C_I}{C_S - C_I} \right) \right)} \right]^2, \quad (8)$$

де $\operatorname{erfc}()$ – додаткова функція помилок.

У роботі [20] показано, що врахування граничних та початкових умов при $x > 0, t = 0$ концентрація іонів хлориду $C(x,t) = C_I$ в розв'язку диференціального рівняння (6) є зайвим, внаслідок малості C_I порівняно з концентрацією хлоридів на поверхні захисного шару бетону C_S . В цьому випадку розв'язок рівняння (6) має дещо простішу форму і час прогнозу насичення хлоридами захисного шару бетону до критичного значення C_{cr} визначається формулою:

$$T_{cl} = \frac{1}{D} \left[\frac{a}{\left(2 \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{cr}}{C_S} \right) \right)} \right]^2, \quad (9)$$

Залежностями (4) та (8–9) визначається час прогнозу деградації захисного шару бетону:

$$T_I = T_c \text{ при } T_c < T_{cl}; T_I = T_{cl} \text{ при } T_{cl} < T_c. \quad (10)$$

Що стосується часу корозії арматури T_2 то ця проблема сьогодні достатньо вивчена. Є велика кількість робіт, як наприклад [4, 5, 7, 9], що дають змогу достатньо достовірно визначити час корозії арматури до критичного рівня та критерії ресурсу за арматурою.

Наведена детерміністична модель життєвого циклу має низку недоліків, таких як неможливість врахування напружено-деформованого стану захисного шару бетону, недостатньо вивчений коефіцієнт дифузії тощо. А головним недоліком, як і для всякої детерміністичної моделі, є ігнорування того факту, що процес деградації захисного шару бетону насправді є стохастичним.

Стохастична модель життєвого циклу. Процес деградації елемента протягом життєвого циклу описується тут моделлю, яка ґрунтується на теорії випадкових марковських процесів. Життєвий цикл елемента поділено на п'ять дискретних станів. Кожен зі станів описується добіркою якісних та кількісних показників деградації, що характеризують ієрархію відмов елемента [8]. Задача опису деградації елемента формулюється як визначення ймовірності переходу системи з дискретного стану S_i в S_{i+1} , $i = 1, 2, \dots, 5$ за умови, що час переходу є неперервною функцією. В такій

постановці модель деградації елемента трактується як дискретний стохастичний марковський процес з безперервним часом.

Ймовірності марковського ланцюга (матриця перехідних ймовірностей) $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ – функції часу, визначаються розв’язком системи диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = \sum_k \lambda_{ik} p_{kj}(t), \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

за початкових умов $p_{ij}(0) = \delta_{ij}$, де δ_{ij} – символ Кронекера.

Нашою моделлю деградації встановлюється зв’язок між надійністю та часом експлуатації елемента. Перехід із одного дискретного стану в інший описується як процес Пуассона з дискретними станами та неперервним часом. Це окремий випадок марковського процесу. Інтегральна функція розподілу $P(t)$ для часу T_n , котрий проходить, доки стануться всі n подій процесу, має вигляд:

$$P(t) = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (12)$$

де $P(t)$ – ймовірність того, що елемент перейде в стан k протягом часу $t < T_k$; $\lambda = \lambda(t)$ – параметр процесу – інтенсивність відмов.

Для випадку п’яти дискретних станів з урахуванням (12) модель деградації запишемо так:

$$P_t = 1 - 0,008333 (\lambda t)^5 e^{-\lambda t} \quad (13)$$

Зауважимо, що підхід, оснований на моделі марковського стохастичного процесу, вже успішно застосовується для оцінки і прогнозу технічного стану елементів транспортних споруд, що перебувають в експлуатації [8]. В цьому випадку процес деградації елемента протягом життєвого циклу описується одним параметром λ – показником інтенсивності відмов. Цей показник приймається постійним, незалежним від часу. Ефективність такого прийому була продемонстрована свого часу в роботі [2] для розв’язання задачі ймовірності рідких викидів за функцію надійності при $\lambda = \lambda(t)$.

Для прогнозу ресурсу залізобетонних елементів мостів на стадії проектування модель (13) є малоефективною. Очевидно, що для управління довговічністю одного параметра λ недостатньо. Тому, щоби надати моделі (13) чутливості до фізичних, механічних, конструктивних характеристик та умов навколишнього середовища, пропонуємо модель деградації в такій формі:

$$P(\lambda, t) = 1 - 0,008333 a^5 \exp(-a) \left[\frac{1}{H_0 \exp(-H_1^2 a^2) + H_2} \right], \quad (14)$$

де $a = \lambda t$ – параметр процесу деградації; H_0, H_1, H_2 – функції, що залежать від коефіцієнтів – характеристик елемента і навколишнього середовища m_i . Коефіцієнтів прийнято п’ять:

- m_1 – коефіцієнт водоцементної характеристики бетону;
- m_2 – коефіцієнт типу армування залізобетонного елемента;
- m_3 – коефіцієнт типу статичної схеми елемента в споруді;
- m_4 – коефіцієнт технології спорудження;
- m_5 – коефіцієнт умов навколишнього середовища.

Графіки на рис. 2 демонструють форму деградаційної кривої для двох різних наборів коефіцієнтів m_i . Модель (14) при заданому граничному значенні надійності елемента P_{lim} дає час прогнозу ресурсу залізобетонного елемента моста та час переходу з одного експлуатаційного стану в інший.

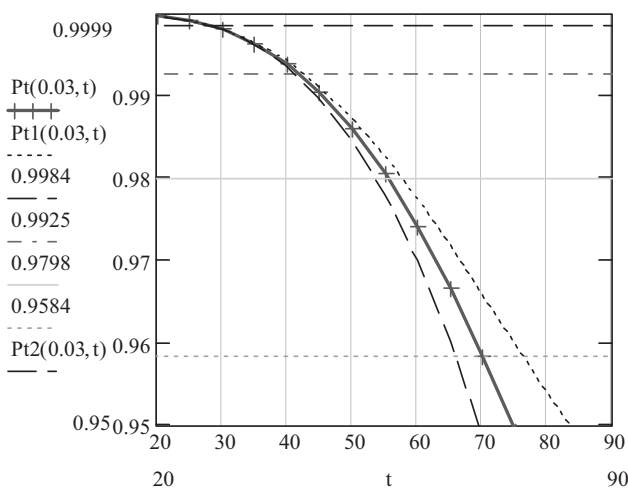


Рис. 2. Криві деградації елемента за моделями (13) – $Pt(t)$ та (14) – $Pt1(t), Pt2(t)$ при $\lambda = 0,03$

Висновки

1. У статті наголошується, що довговічність залізобетонних мостів, запроектованих відповідно до чинних на час проектування нормативних вимог, яка повинна становити 100 років, насправді для України сьогодні не перевищує 45–50 років. Є всі підстави вважати, що зниження довговічності залізобетонних елементів мостів закладається ще на стадії вишукування і проектування споруди, оскільки в сучасному апараті проектування залізобетонних елементів немає ніяких важелів управління довговічністю. Цими обставинами зумовлена необхідність розроблення моделей життєвого циклу залізобетонних елементів мостів. Ми вважаємо, що сьогодні є нагальна потреба в об'єднанні наукового базису досліджень деградації залізобетону з вимогами правил проектування, умов будівництва й експлуатації та отриманні теоретичних моделей оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів, які стали б основою в розробленні практичного апарату управління життєвим циклом мостів.

2. Наведена детерміністична модель вже сьогодні є досить перспективною для проектною практики як інструмент управління довговічністю залізобетонних елементів мостів. Вона потребує певного імовірнісного вдосконалення й експериментального застосування, після чого її можна буде внести до нормативних документів проектування.

3. Наведена тут стохастична модель є універсальнішою і простішою в застосуванні. Проте сьогодні ця модель потребує ще значної роботи з обґрунтування її коефіцієнтів. Вона подається задля дискусії.

1. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисиль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М., 1990. 2. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1971. 3. Блихарский З.Я., Хмель Р.Е., Струк Р.Ф. Влияние карбонизации бетона на предпосылки коррозии арматуры железобетонных конструкций автомобильного комплекса // Дороги і мости. – Вип. 6 – К.: ДерждорНДІ, 2006. – С. 229–239. 4. Бліхарський З.Я., Стацук М.Г., Малик О.М. Моделювання корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі // Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж. – Донецьк, 2003. – С. 318–324. 5. Васильев А.И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автомобильных мостов // Бетон и железобетон. – М., 2000. – № 2. – С. 20–23. 6. Глагола І.І., Методи визначення корозійної тривкості, довговічності та антикорозійний захист залізобетонних конструкцій // Автореф. дисерт. к. т. н. – К., 2004. 7. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1981. 8. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2009 “Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автомобільних мостів”. – Мінрегіонбуд України. – К., 2009. 9. Карпунин В.Г., Клецев С.И., Корнишин М.С. К расчету пластин и оболочек с учетом обшей коррозии // Труды X Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. – Т. 1. – Тбилиси, 1975. – С. 166–174. 10. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 1999. – Вип. 57. – С. 183–188. 11. Лантух-Лященко А.І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації // Вісник Транспортної Академії України. – № 3. – К., 1999. – С. 59–63. 12. Лучко Й.Й., Глагола І.І., Козаревич Б.Л. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд. – Львів: Каменяр, 1999 – 229 с. 13. Маринин А.Н. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния железобетонных мостовых пролетных строений с учетом хлоридной коррозии и карбонизации: диссерт. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2007. – 383 с. 14. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин // Зб. наукових статей / Науковий керівник – академік НАН України Б.Є. Патон. – Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. – К., 2006. 15. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974. – 20 с. 16. СНиП 2.05.03-84 “Мосты и трубы”, Госстрой СССР. – М.: ЦИТП. – 1985. 17. Matsumoto T. Beng S. S. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance. Proceeding Japan-Taiwan international workshop on urban regeneration. Maintenance and green material. – 2005. – P. 23–36. 18. “New Approach to Durability Design”, - CEB Bulletin d'Information. – № 238, 1997 19. Service-Life Prediction/ – State of the Art Report/ Reported by ACI Committee 365// ACI Manual of Concrete Practice. – Part 1. – 2001. 20. Takewaka, K. and Mastumoto, S., “Quality and Cover Thickness of Concrete based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments”, ACI SP 109-17, American Concrete Institute, 1988. – P. 381–400.