

УДК: 624.21

ЧУТЛИВІСТЬ МОДЕЛІ ДЕГРАДАЦІЇ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ

Ф.В. Яцко, асистент, Національний транспортний університет, м. Київ

Анотація. Представлено аналіз моделі деградації залізобетонних елементів мостів, запропонованої автором, побудованої за статистичним методом з урахуванням впливу навколишнього середовища та напружено-деформованого стану. Наведено результати оцінки довговічності залізобетонного елемента.

Ключові слова: довговічність, стохастичний процес, метод Монте-Карло, рівняння дифузії, хлоридизація, корозія арматури, статистичний метод.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МОДЕЛИ ДЕГРАДАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВ

Ф.В. Яцко, ассистент, Национальный транспортный университет, г. Киев

Аннотация. Представлен анализ модели деградации железобетонных элементов мостов, предложенной автором, построенной при помощи статистического метода, учитывая влияние окружающей среды и напряженно-деформированного состояния. Приведены результаты оценки долговечности железобетонного элемента.

Ключевые слова: долговечность, стохастический процесс, метод Монте-Карло, уравнения диффузии, хлоридизация, коррозия арматуры, статистический метод.

SENSITIVITY OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE ELEMENTS DEGRADATION MODEL

F. Yatsko, assistant, National Transport University, Kyiv

Abstract. This article presents the analysis of the degradation model of reinforced concrete bridge elements, built using a statistical method, taking into account both the influence of the environment and of the stressed-strained state. The results of calculations of reinforced concrete element durability are offered.

Key words: longevity, stochastic process, method of Monte Carlo, diffusion equations, chloridization, corrosion of reinforcement, statistic method.

Вступ

Питання про оцінку довговічності мостів в Україні стає все більш актуальним. Вчені сьогодні докладають багато зусиль для того, щоб споруджувати мости водночас відповідали всім експлуатаційним вимогам і були найбільш ефективними з точки зору використання ресурсів. Норми [2] регламентують терміни служби основних елементів мостів; в той же час на сьогодні не існує загально-

прийнятої моделі перевірки довговічності елементів, а отже і відповідності елементів моста вимогам норм щодо довговічності.

Аналіз публікацій

В роботах [1, 3–12, 17] містяться дані щодо реального терміну служби залізобетонних елементів мостів. Констатуємо, що середній термін служби залізобетонних прогонових будов мостів України не перевищує 45–50

років. 21 % залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів на дорогах державного значення перебувають у четвертому експлуатаційному стані, їх середній вік становить 45 років; при цьому 82 % автодорожніх мостів знаходиться на місцевих дорогах і їх технічний стан є гіршим). Зниження реального середнього терміну служби залізобетонних прогонових будов мостів до 50–60 років спостерігається також і в країнах Європи, США і Японії.

Єдиним важелем при розрахунках, для врахування умов роботи споруди, є коефіцієнти надійності і відповідальності споруди. Стає зрозумілим, що цього недостатньо, і статистика нашою є на думку про те, що занижку довговічності закладено вже на стадії проектування.

Автором розроблено модель оцінки довговічності залізобетонних елементів мостів, що ґрунтується на методі Монте-Карло, який враховує стохастичний характер змін у життєвому циклі елемента і за допомогою статистичного підходу дає можливість оцінити довговічність елемента для конкретних умов роботи.

Цю статтю присвячено аналізу чутливості моделі деградації залізобетонних елементів мостів до зміни різноманітних чинників, що формують життєвий цикл споруди.

Мета і постановка задачі

Метою роботи є аналіз моделі оцінки довговічності залізобетонного елемента, розробленої автором і представленої в попередніх роботах.

Формулювання задачі

Довговічність можна виразити через надійність як ймовірність досягнення граничного стану за час τ [12, 13]. Для цього вводиться функція граничного стану, залежна від часу

$$g(X, \tau) = R(X, \tau) - S(X, \tau), \quad (1)$$

де $R(x, \tau)$ – узагальнений опір елемента; $S(x, \tau)$ – узагальнений навантажувальний ефект; X – вектор базових змінних; τ – змінна часу.

Тут теоретичною базою опису швидкості деградації захисного шару бетону є загальні

закони аналітичної теорії дифузії, відомі як рівняння першого і другого законів Адольфа Фіка [1]

$$Q = -D_{\text{еф}} \frac{C(h, \tau)}{\partial h}, \quad (2)$$

де Q – кількість перенесеної в результаті дифузії речовини (в даному випадку – вуглецю), так звана щільність дифузійного потоку; $C(h, t)$ – концентрація речовини, що дифундує, функція координати h і часу τ ; $D_{\text{еф}}$ – ефективний коефіцієнт дифузії газу в бетоні.

$$\frac{\partial C(h, \tau)}{\partial \tau} = D_{\text{еф}} \frac{\partial^2 C(h, \tau)}{\partial h^2}, \quad (3)$$

де $C(h, t)$ – концентрація іонів речовини на глибині h у час τ ; $D_{\text{еф}}$ – ефективний коефіцієнт дифузії; τ – час (рахується від початку експлуатації); h – координата, нормальна до поверхні бетону.

З урахуванням впливу напружень на швидкість корозії арматури з роботи [14] швидкість деградації арматури

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = v_0 \exp\left(\frac{V\sigma}{RT}\right), \quad (4)$$

де δ – глибина корозійного ушкодження арматури; v_0 – швидкість корозії за відсутності напружень; V – мольний об'єм кородуючого металу; σ – напруження в арматурі; R – універсальна газова стала; T – температура.

Ефективний коефіцієнт дифузії ($\text{м}^2/\text{с}$) визначається згідно з [16]

$$D_{\text{еф}i} = K_{\text{еф}i} D_0, \quad (5)$$

де $K_{\text{еф}i}$ – коефіцієнт ефективності

$$K_{\text{еф}i} = \frac{\left[1 + \frac{(1-H_i)^4}{(1-H_c)^4}\right]^{-1} e^{q\left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K_i}\right)}}{\tau_i^m} \times \left[1 + A_i \left(\frac{\sigma_i}{f}\right)\right]^2, \quad (6)$$

де m – фактор впливу часу; H_i – вологість повітря (%); H_c – критична вологість повітря (75 %); q – константа активації дифузії; K_0 – кімнатна температура; K – температура в час

τ ; A_i – коефіцієнт, що залежить від типу напружень у бетоні (за стиску $-0,0236$, розтягу $+0,0496$); σ_i – напруження в бетоні; f – граничний опір бетону; D_0 – початковий коефіцієнт дифузії [16]

$$D_0 = 10^{(-12,06+2,4B/C)} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (7)$$

де В/Ц – водоцементне співвідношення.

Вираз для визначення глибини деградації бетону при кожному розіграші

$$x_i = \sqrt{2D_0 K_{\text{еф}i} \Delta\tau}. \quad (8)$$

Глибина корозії арматури за обраний проміжок

$$\delta_i = v_0 \exp\left(\frac{V\sigma}{RT}\right) \Delta\tau. \quad (9)$$

Таким чином, провівши певну кількість розіграшів, отримаємо значення функції граничного стану (2) за кожний проміжок часу

$$g_i = R(x_i, \delta_i, \Delta\tau) - S_i, \quad (10)$$

де $R(x_i, \delta_i, \Delta\tau)$ – опір елемента у заданий період часу з урахуванням деградації; S_i – навантаження.

Тоді час до настання граничного стану дорвнює

$$T = \sum \Delta\tau_{g>0}. \quad (11)$$

Алгоритм моделі

1. Ввод даних

Силві фактори: M_{Pn} – характеристичний згинальний момент від тандему АК; M_{vn} – характеристичний згинальний момент від смугового навантаження АК; M_{Hn} – характеристичний згинальний момент від натовпу на тротуарах; M_{gn} – характеристичний згинальний момент від постійного навантаження. Характеристика досліджуваного перерізу елемента: R_{bn} – характеристичний тимчасовий опір бетону стисканню; R_{pn} – характеристичний тимчасовий опір арматури розтягу; W – момент опору перерізу; A_p – площа робочої поздовжньої арматури.

Корозійні властивості, концентрації хлоридів, критичні концентрації: C_s – критична концентрація хлоридів на поверхні арматури для початку активної корозії арматури; C_0 – початкова концентрація хлоридів на поверхні бетону; v_0 – швидкість корозії за відсутності напружень; В/Ц – водоцементне співвідношення.

Властивості середовища: зміна температури K і вологості H за місяцями.

Кількість випробувань N .

2. Розіграш випадкових змінних K_i ; H_i ; m_i ; $\sigma_{b,i}$; $R_{b,i}$; A_i за нормальним законом розподілу, які відповідають i -му місяцю життєвого циклу.

3. Обчислення $K_{\text{еф}i}$ – коефіцієнта ефективності і $D_{\text{еф}i}$ – ефективного коефіцієнта дифузії для i -го місяця.

4. Визначення зміщення фронту хлоридизації $X_{Cl,i}$.

Кроки 2–4 повторюються до утворення на поверхні арматури критичної концентрації хлоридів C_s . 1 крок – один місяць експлуатації. Кількість кроків до утворення критичної концентрації є часом деградації захисного шару τ_{Cl} .

5. Формується вектор швидкості деградації арматури і відповідний йому вектор зміни моменту опору перерізу елемента $\frac{\partial \delta}{\partial \tau}$ і $\frac{\partial W}{\partial \tau}$ відповідно.

6. Розіграш випадкових змінних $R_{b,i}$; W_i ; M_{Pn} ; M_{vn} ; M_{Hn} ; M_{gn} за обраним законом розподілу, які відповідають i -му місяцю життєвого циклу.

7. Обчислення M_{ui} – несучої здатності і M_i – згинального моменту від всіх видів навантажень для i -го місяця. Порівняння M_{ui} і M_i .

Кроки 6–7 повторюються до вичерпання ресурсу, тобто до моменту настання критичного стану.

Кроки 2–7 повторюються N разів. Будуються гістограми результатів.

Аналіз отриманих результатів виконаємо на прикладі (рис. 1).

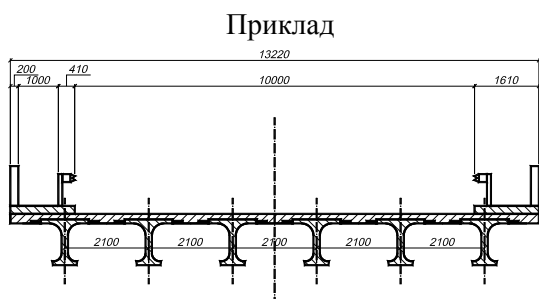


Рис. 1. Поперечний переріз мосту

Прогонова будова має довжину 24 м; у поперечному перерізі мосту розташовано 6 балок висотою 1,15 м і відстанню в осях 2,1 м. Навантаження – А-15. Товщина монолітного шару бетону плити проїзної частини над балками дорівнює 14 см. Габарит – 10 м.

Тротуари виконано у монолітному варіанті, огорожа безпеки – металева бар’єрного типу висотою 75 см, поручнева огорожа – металева безстоякова висотою 110 см.

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В40. Робоча арматура балок – попередньо-напружена з дроту діаметром 5 мм зі сталі класу В-II. Балку армовано пучками, кожен з яких містить 24 дроти.

Робоча арматура являє собою 11 арматурних пучків загальною площею 51,81 см² (площа одного пучка 24 Ø 5 f=4,71см²). Розташування арматури в перерізі балки зображено на (рис. 2).

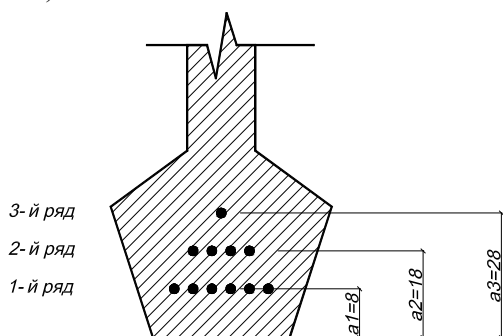


Рис. 2. Розташування арматури

Район будівництва – м. Київ, критична концентрація хлоридів на поверхні арматури для початку активної корозії арматури – $C_s=0,2\%$; початкова концентрація хлоридів на поверхні бетону – $C_0=0,6\%$; кількість випробувань – $N=1000$.

Ймовірнісне вирішення наведено на рис. 3.

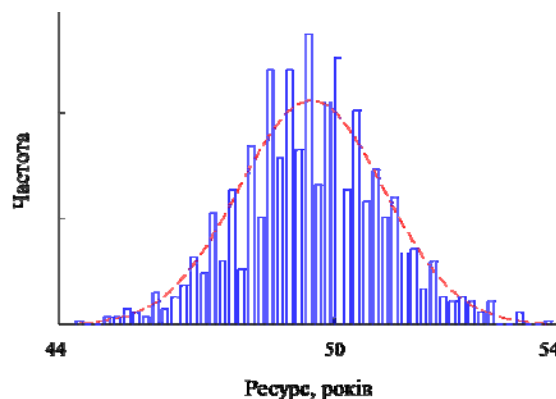


Рис. 3. Гістограма ресурсу

Необхідно зауважити, що дослідження є першим наближенням і отримані результати – предмет дискусії.

Щоби перевірити, як впливає кількість випробувань на результат, кількість випробувань змінювали (результати наведено в табл. 1).

Таблиця 1 Вплив кількості випробувань на результат

	Кількість випробувань, N				
	1000	5000	10000	20000	50000
μ_T , років	48,799	48,796	48,794	48,772	48,783
σ_T	1,539	1,578	1,564	1,582	1,567

Оскільки, як видно з табл. 1, починаючи з $N=1000$, результати обчислення коливаються дуже незначною мірою, можна припустити, що оптимальна кількість випробувань становить 1000.

Одним з найважливіших чинників, що впливають на швидкість деградації захисного шару, є водоцементне співвідношення (в роботі взято В/Ц в межах від 0,25 до 0,5).

Таблиця 2 Вплив В/Ц на строк служби елемента

В/Ц	μ_T , років	σ_T	Різниця, %
0,25	56,317	1,661	11,8
0,3	49,689	1,615	
0,35	43,975	1,53	11,5
0,4	39,186	1,438	10,8
0,45	35,057	1,351	10,5
0,5	31,568	1,329	9,95

Таблиця 2 наочно демонструє, наскільки серйозним є вплив В/Ц на довговічність залізобетону; так, за зміни В/Ц з 0,25 до 0,35 довговічність зменшується на 13 років.

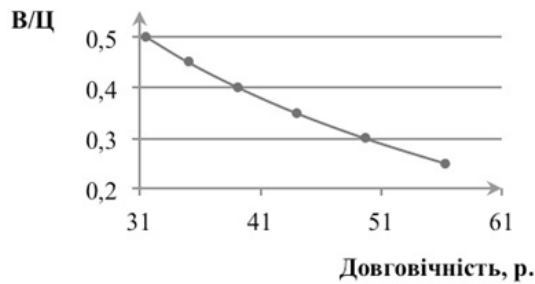


Рис. 4. Графік залежності В/Ц і довговічності

Для дослідження впливу кліматичних умов порівнювалися результати, отримані для умов міста Києва, з умовами міст Чернігова, Сімферополя, Луганська та Львова. Дані кліматичних умов взято з [17]. Основними показниками кліматичних умов у моделі обрано середньомісячну температуру повітря і відносну вологість повітря.

Таблиця 3 Вплив кліматичних умов на строк служби елемента

Місто	μ_T , років	σ_T	Різниця, %
Київ	48,799	1,539	
Чернігів	45,822	1,528	-6,1
Сімферополь	49,484	1,522	+1,4
Луганськ	56,598	1,639	+16,0
Львів	44,277	1,475	-9,3

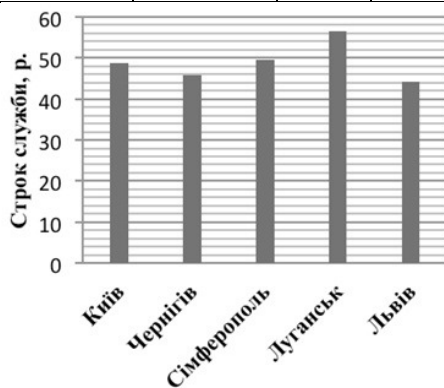


Рис. 5. Залежність кліматичних умов і терміну служби

Як показує розрахунок, залежно від регіону розташування мосту (табл. 3) довговічність може коливатись у межах приблизно 20 %, що істотно, якщо мати на увазі можливі передчасні затрати на ремонт. Така різниця, наприклад, між умовами міст Чернігова і Луганська в довговічності зумовлена достатньо невеликою, але значущою різницею в показниках вологості і температури.

Так, середня річна відносна вологість повітря в Луганську – 71 %, а в Чернігові – 79 % відповідно. У свою чергу процес проникнення хлоридів у бетон прямо залежить від кількості води в порах цементного каменю. Підвищена вологість і зумовлює таку різницю в довговічності.

Наступним кроком було визначення реакції моделі на зміну навантаження на елемент (головну балку моста). Для цього навантаження змінювалось у межах 5 %, 2,5 %, 1,25 %.

Таблиця 4 Вплив інтенсивності навантаження на строк служби елемента

Зміна навантаження, %	μ_T , років
-5	50,435
-2,5	49,985
-1,25	49,893
0	48,799
+1,25	48,544
+2,5	48,44
+5	48,141

Цікавою виявилася нелінійна залежність зміни інтенсивності навантаження і довговічності; наприклад, за зменшення навантаження на 1,25 % очікується подовження строку служби на 2,24 %, тоді як за збільшення навантаження на такий саме відсоток отримано лише 0,5 % зменшення строку служби.

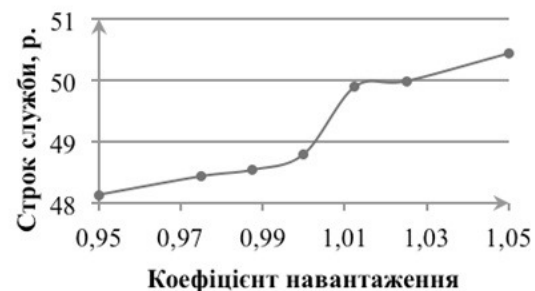


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнта навантаження і строку служби

Висновки

1. Розробка адекватної моделі оцінки ресурсу дає важелі більш ефективного керування життєвим циклом споруди.
2. Підсумовуючи наведені результати й аналізуючи натурні спостереження, необхідно зазначити, що навіть у межах України споруди однакових конструктивних рішень мають різний ресурс, залежно від регіону.

3. Аналіз моделі показав значну її гнучкість і можливість використання в реальних розрахунках.

4. Співставлення результатів дослідження з результатами обстежень, натурних даних вказують на достатню точність для практичного застосування.

5. Постає питання про необхідність збору інформації про концентрацію хлоридів на території України в місцях розташування мостів або місцях, де планується їх будівництво.

Цю роботу виконано під керівництвом доктора техн. наук, професора Лантуха-Лященко А.І. Висловлюю йому щиро подяку.

Література

1. Бліхарський З.Я. Моделювання корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі / З.Я. Бліхарський, М.Г. Стащук, О.М. Малик // *Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж: матер. Міжнар. конф. – Донецьк: Українська асоціац. з металев. констр., 2003. – С. 318–324.*
2. Мости і труби. Основні вимоги проектування: ДБН В.2.3-22-2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 58 с.
3. Лантух-Лященко А.И. О прогнозе остаточного ресурса моста / А.И. Лантух-Лященко // *Дороги і мости: зб. наук. пр. – 2007. – Вип. 7. – Т.2. – С. 3–9.*
4. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974. – 20 с.
5. New Approach to Durability Design. – *CEB Bulletin Information No.238, 1997. – 152 с.*
6. Hartt W. Critical Literature Review of High-Performance Corrosion. Reinforcements in Concrete Bridge Applications / W. Hartt, R. Powers, V. Leroux, D.K. Lysogorski // *Center for Marine Materials. – Florida Atlantic University, 2004. – 53 p.*
7. Takewaka K. Quality and Cover Thickness of Concrete based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments / K. Takewaka, S. Mastumoto // *ACI SP 109-17, American Concrete Institute, 1988. – P. 381–400.*
8. Matsumoto T. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance / T. Matsumoto, S.S. Beng // *Proceeding Japan-Taiwan international workshop on urban regeneration. Maintenance and green material. – 2005. – P. 23–36.*
9. Бліхарський З.Я. Влияние карбонизации бетона на предпосылки коррозии арматуры железобетонных конструкций автодорожного комплекса / З.Я. Бліхарський, Р.Е. Хмиль, Р.Ф. Струк // *Дороги і мости: зб. наук. пр. – 2006. – Вип. 6. – С. 229–239.*
10. Глагола І.І. Методи визначення корозійної тривкості, довговічності та антикорозійний захист залізобетонних конструкцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня, к.т.н.: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / І.І. Глагола. – К.: 2004. – 24 с.
11. Лучко Й.Й. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд / Й.Й. Лучко, І.І. Глагола, Б.Л. Козаревич. – Л.: Каменяр, 1999. – 230 с.
12. Melchers R.E. Structural Reliability Analysis and Prediction / R.E. Melchers / *Second Edition. John Wiley & Sons. – New York: 1999. – 437 p.*
13. Probabilistic Model Code. – 12th draft. Joint Committee on Structural Safety. PART I – BASIS OF DESIGN – JCSS-OSTI/DIA/VROC-10-11-2000, ETH Zurich. 2000. – 64 p.
14. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Э.М. Гутман. – М.: Металлургия, 1981. – 282 с.
15. Trevor J. Kirkpatrick Impact of Specification Changes on Chloride Induced Corrosion Service Life of Virginia Bridge Decks / J. Trevor. – Blacksburg, Virginia, 2001. – 125 с.
16. Рекомендації з уточнення технічного стану елементів мостів в залежності від умов довкілля. – К.: Державна служба автомобільних доріг України, 2008. – 32 с.
17. Сайт <http://www.meteoprog.ua/>

Рецензент: В.С. Шмуклер, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 9 серпня 2012 р.