УДК: 624.21.059.1 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.151.2015.68675

ДО ПРОБЛЕМИ ПРОГНОЗУ РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ

Магістр Ф.В. Яцко

К ПРОБЛЕМЕ ПРОГНОЗА РЕСУРСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВ

Магистр Ф.В.Яцко

TO THE LIFE PREDICTION PROBLEM OF CONCRETE BRIDGE ELEMENTS

Magister F.V.Yatsko

Пропонується теоритично обгрунтована модель прогнозу життєвого циклу елементів автодорожніх мостів. Довиться принципова можливість використання розробленої моделі прогнозу ресурсу при проектування залізобетонних згинаних елементів на заданий термін служби. Вперше пропонується модель, призначена для прогнозування ресурсу елемента на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування. Запропоновано практичну

інженерну методику оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів в процесі проектування.

Ключові слова: *деградація захисного шару, корозія арматури, ресурс, життєвий цикл, характеристика безпеки.*

Предлагается теоретически обоснованная модель прогноза жизненного цикла элементов автодорожных мостов. Доказана принципиальная возможность использоваия разработаной модели прогнозирования ресурса при проектировании железобетонных изгибаемых элементов на заданный строк службы. Впервые предложена модель, предназначенная для прогнозирования ресурса элементов на всех этапах жизненного цикла, начиная от проектирования.Предложена практическая инженерная методика оценки ресурса железобетонных элементов мостов в процессе проектирования.

Ключевые слова: *деградация защитного слоя, коррозия арматуры, ресурс, характеристика безопасности.*

Article deals with investigation within the new paradigm of the theory of structures - obtaining fundamental equations of stressed-strained state of a function of time. Theoretical models of this trend are based on the latest representations of concrete and reinforcement Mechano-Physics, containing parameters adopted in the design of structures and in the evaluation of influence of environment. Article deals with scientific research of life cycle prediction model of road bridges.The task of the research is to find modeling functions of the functional characteristics reduction of element during the time of operation. Principal possibility of using the lifetime prediction model for reinforced concrete elements when designing for the specified service life is represented. The lifetime prediction model for reinforced concrete elements for the specified service life at all stages of the life cycle, starting from the design is proposed. A practical engineering service life evaluation technique for reinforced concrete bridge elements in the design process.

Keywords*: degradation of the protective layer, corrosion of reinforcement, service life, reliability factor.*

Вступ. Стаття присвячена дослідженню в рамках нової парадигми теорії споруд – отриманню фундаментальних рівнянь напружено-деформованого стану елементів в функції часу. Необхідність нових підходів в проектуванні транспортних споруд очевидна і назріла давно.

Для автодорожніх мостів України проблема повстала особливо гостро в останні 10 – 15 років. За статистичними даними Укравтодору [4] сьогодні середній термін служби залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів складає 45 – 50 років тоді як, згідно чинних вимог на проектування [6], цей термін має бути мінімум 80 – 100 років. За останнє десятиріччя з’явились публікації, в яких висловлюється теза про те, що зниження довговічності, в значній мірі, закладається ще на стадії вишукування і проектування споруди.

Дійсно, в сучасному апараті проектування залізобетонних елементів (і не тільки мостів) немає ніяких явних важелів управління довговічністю. Термін життєвого циклу залізобетонних мостів призначається директивно [6], розрахункові залежності не мають змінної часу, проблема довговічності знаходиться цілком в площині досвіду і інтуїції проектувальника.

Аналіз досліджень і публікацій. З початком нового століття проблема довговічності залізобетонних елементів стає предметом уважного вивчення українських науковців. Науковий базис марковської феноменологічної стохастичної моделі накопичення пошкоджень елементів мостів [9,10, 17] послужив основою першого, на терені пострадянських країн, нормативного документу з прогнозу ресурсу транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації [7].

Сьогодні доведена адекватність марковської стохастичної моделі

нормативного документу [6], вона стала центральним методичним ядром системи експлуатації автодорожніх мостів України. На жаль марковська ймовірнісна модель має тільки один керуючий параметр – швидкість деградації (інтенсивність відмов), який визначається в роботі [7] на основі історичних даних експлуатації і не може бути застосованою для прогнозування ресурсу споруди на етапі проектування. Ця обставина була поштовхом до розробки в останні роки нових моделей життєвого циклу залізобетонних елементів, які могли би стати інструментарієм керування довговічністю ще на етапі проектування.

Теоретичні моделі цього напряму базуються на новітніх уявленнях механо-фізики бетону і арматури, містять параметри прийняті в проектуванні споруд та в оцінці впливу навколишнього середовища [1,2,8,13,14,15,18]. Саме такого плану є дослідження, основні положення якого, викладені в цій статті.

Мета. Центральна мета дослідження полягає у науковому пошуку моделі прогнозу життєвого циклу елементів автодорожніх мостів, що дасть можливість оцінити довговічність елементів мостів в функції часу, а відтак прогнозувати їх ресурс за проектними параметрами та характеристиками навколишнього середовища. Основним завданням роботи є теоретичний пошук закономірностей деградації залізобетонних елементів мостів з плином часу та розробка методології оцінки ресурсу споруди протягом всього життєвого циклу залізобетонного елемента.

Формулювання задачі дослідження.Задача дослідження полягає в пошуку функції якою моделюється зниження функціональних характеристик елемента протягом часу життєвого циклу експлуатації. В загальному вигляді функція моделі представляється так:

$$T_{cr} = f_1(t_P, p_i, K_{RB}) + f_2(t_{cor1}, p_j, K_{RA}) + f_3(t_{cor2}, p_j, K_{RA}),\ i = 1, 2, .., k, j = 1, 2, .., n, \quad (1)$$

де f_1 – модель деградації захисного шару бетону елемента;

f_2 – модель деградації арматури елемента;

t_P – час деградації захисного шару бетону елемента;

t_{cor} – час деградації арматури елемента;

p_i – параметри, що характеризують початкові фізичні, хімічні, механічні властивості бетону та вплив оточуючого середовища;

p_j – параметри, що характеризують початкові механічні характеристики арматури, рівень напружень в арматурі та вплив оточуючого середовища;

K_{RB} – критерій досягнення критичного стану захисного шару бетону елемента;

K_{RA} – критерій досягнення граничного стану експлуатації за втратами арматури.

Модель життєвого циклу. Модель базується на таких гіпотезах:

А. Життєвий цикл в експлуатації розглядається як двофазний процес: деградація бетону захисного шару елемента та фаза деградації арматури.

Б. Моделлю деградації бетону описується процес карбонізації та насичення хлоридами захисного шару елемента. Критерієм процесу є карбонізація та насичення хлоридами захисного шару на повну товщину. Карбонізація і насичення захисного шару хлоридами починаються одночасно одразу після разопалубки та проходять незалежно і паралельно.

В. Моделлю деградації арматури описується процес корозії арматури, який починається після повної карбонізації захисного шару зі швидкістю корозії v_1 в карбонізованому бетоні. В процесі насичення кількість хлоридів на поверхні робочої арматури досягає критичного рівня (повне насичення хлоридами захисного шару) і швидкість корозії прискорюється до значення $v_2 > v_1$. Критерієм процесу деградації арматури є граничне значення надійності залізобетонного елемента за арматурою при експлуатації.

Г. Процеси деградації бетону і арматури проходять послідовно, не корелюють, перехідні фази відсутні.

В графічній інтерпретації процес деградації показаний на рис.1

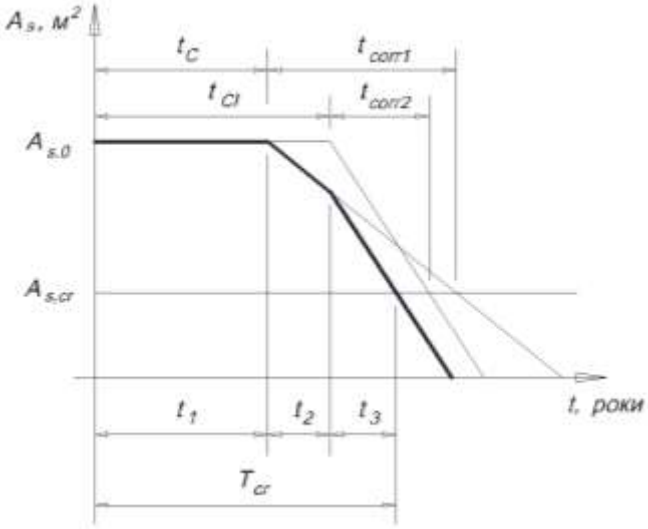

Рис. 1. Схема деградації залізобетону

A_{s0} – проектна площа поперечного перерізу робочої арматури; A_{cr} –площа поперечного перерізу робочої арматури за граничних умов; t_1 – час корбонізації захисного шару; t_{CL} – час насичення захисного шару хлоридами; t_{corr1} – період корозії арматури в карбонізованому бетоні; t_{corr2} – період корозії арматури в бетоні насиченому хлоридами; t_1,t_2,t_3, – періоди життєвого циклу; T_{cr} – ресурс.

Час карбонізації захисного шару визначимо залежністю:

$$t_1 = \frac{m \cdot x^2}{4D_e} \qquad (3)$$

де x – товщина захисного шару, м;

D_e ефективний коефіцієнт дифузії [12];

m – Реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні згідно документу [11].

Другий період життєвого циклу t_2 – період, впродовж якого арматура кородує в умовах карбонізованого бетону, концентрація хлоридів недостатня для активації хлоридної корозії:

$$t_2 = t_{CL} - t_1 = \frac{1}{K_{эф} \cdot D_0}\left[\frac{x}{2 \cdot erf^{-1}\left(1 - \frac{C_{CR} - C_1}{C_S - C_1}\right)}\right]^2 - t_1, \qquad (3)$$

де C_S – концентрація хлорид-іонів на поверхні елемента;

C_1 – початкова концентрація хлорид-іонів всередині бетону;

C_{CR} концентрація хлорид-іонів на глибині x,необхідна для початку активної корозії арматури;

$erfc(.)$ – додаткова функція помилок;

$K_{еф}$ – коефіцієнт ефективності;

D_0 – початковий коефіцієнт дифузії з урахуванням впливу складу бетону λ і вмісту летючої золи (ξ, %) [17].

Математичне очікування несної здатності, що відповідає граничній характеристиці безпеки β:

$$\mu_R(\beta) = -\frac{\mu_Q + \beta \cdot \mu_Q \sqrt{V_Q^2 - V_Q^2 \cdot V_R^2 \cdot \beta^2 + V_R^2}}{V_R^2 \cdot \beta^2 - 1}. \quad (4)$$

де V_Q – коефіцієнт варіації узагальненого навантаження; V_R – коефіцієнт узагальненої опірності елемента; μ_R– математичне очікування узагальненого опору елемента; μ_Q – математичне очікування узагальненого навантаження елемента.

Характеристична несна здатність $M_{\beta n}$, що відповідає граничній характеристиці безпеки β:

$$M_{\beta n} = \mu_R(\beta) \cdot (1 - 1{,}64 V_Q). \quad (5)$$

Вираз для отримання різниці ΔM_n між проектною характеристичною несною здатністю M_{0n}, що відповідає проектній характеристиці безпеки $\beta(0)$ та несною здатністю $M_{\beta n}$, що відповідає $\beta(i)$ обраного експлуатаційного стану:

$$\Delta M_n = M_{0n} - M_{\beta n}. \quad (6)$$

Рівняння зміни діаметру арматури від корозії арматури в умовах карбонізованого бетону Δd_C:

$$\Delta d_C = 2 v_C \cdot (t_2 - t_1) \quad (7)$$

де, v_C – швидкість корозії арматури в умовах карбонізованого бетону. (5)

Ресурс арматури:

$$t_3 = \frac{d - \Delta d_C}{2 \cdot v_{corr}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot R_{bn} \cdot b}{R_{sn} \cdot \pi \cdot n_1 \cdot (d - \Delta d_C)^2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \Delta M_n}{R_{bn} \cdot b \cdot h_{01}^2}} \right)} \right) \quad (8)$$

де R_{sn} – нормативний опір арматури на розтяг (МПа);

R_{bn} – нормативний опір бетону на стиск (МПа);

h_{01}– робоча висота перерізу шару арматури, що розташована на глибині захисного шару;

b– ширина перерізу (м).З урахуванням впливу напружень, температури та вологості на швидкість корозії арматури з роботи [3].

В термінах часу, ресурс елемента:

$$T_{cr} = t_1 + t_2 + t_3, \quad (9)$$

де перший період життєвого циклу t_1 – період депасивації захисного шару, арматура не кородує ;

другий період життєвого циклу t_2 – період, впродовж якого арматура кородує в умовах карбонізованого бетону, концентрація хлоридів недостатня для активації хлоридної корозії;

третій період t_3 – період активної хлоридної корозії, характерізується активним зниженням несної здатності в часі.

Аналіз моделі. Отримана модель деградації арматури є дискретною. Очевидно, що час прогнозу ресурсу елемента за арматурою отримується для фіксованих значень часткового коефіцієнта надійності (які залежать від фіксованих значень характеристики безпеки) проектного та на час експлуатації. Згідно гіпотезі **В.** Критерієм процесу деградації арматури є граничне значення надійності залізобетонного елемента за арматурою при експлуатації. Формат запропонованої моделі деградації арматури прийнято таким, що граничним значенням характеристики безпеки може бути довільне, яке відповідає граничним станам життєвого циклу експлуатації [5].

Виконані в рамках дослідження тестові приклади дають досить реалістичний прогноз ресурсу за моментом згинаних залізобетонних елементів мостів. Один з прикладів наводиться нижче.

Приклад. Елемент залізобетонної балки моста прямокутного перерізу. Переріз показано на рис.2. Геометричні характеристики перерізу: h = 1,5 м; b = 1,4 м; as = 30 ммd =32 мм, n = 6.

Арматуру згідно [6] прийнято класу AIV R_{sn}=590 МПа, бетон В35 R_{bn}=25,5 МПа. Характеристичний момент від постійних і тимчасових навантажень у перерізі M_k = 2600 кНм. Площа перерізу арматури A_s = 48,25 см^2. Район будівництва –м. Київ.

Початкові дані цього прикладу є досить типовими для залізобетонних

елементів мостів. При значенні критерію вичерпання ресурсу елемента за арматурою β_t = 1,74 (досягнення п'ятого експлуатаційного стану) отримуємо ресурс T_{CR} = 65 років. Очевидно, що такий проект не може забезпечити довговічність декларовану нормами проектування [6].

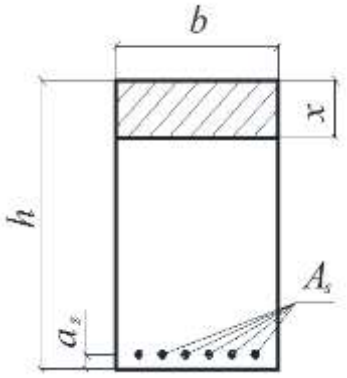

Рис. 2. Переріз залізобетонної балки

Висновки.

1. Вперше ставиться наукова проблема розробки моделей прогнозу ресурсу елементів транспортних споруд протягом всього життєвого циклу, починаючи з етапу проектування. Наукове формулювання проблеми виконано на основі нових уявлень про закономірності деградації залізобетону в елементах конструкцій транспортних споруд отриманих в процесі досліджень та сформульованих теоретичних положень про залежність терміну служби залізобетонних елементів автодорожніх мостів від конструкційних характеристик матеріалів і умов впливу оточуючого середовища.

2. Цим дослідженням доведена принципова можливість використання розробленої моделі прогнозу ресурсу при проектування залізобетонних згинаних елементів на заданий термін служби та відкриває шлях до планування довгострокової стратегії експлуатації мостів.

3. Дискретна структура запропонованого алгоритму реалізації моделі дозволяє його ефективне використання для прогнозу залишкового ресурсу в системі експлуатації залізобетонних елементів мостів як апарат уточнення нормативної моделі [5].

4. Модель прогнозу ресурсу, що пропонується, має вихідні дані усталені в проектуванні елементів мостів і може служити зручним апаратом оцінки ресурсу в проектування залізобетонних елементів на заданий термін служби.

Ця робота виконана під керівництвом професора А.І. Лантуха-Лященка, за що висловлюю йому мою щиру вдячність.

Список використаних джерел

1. Бородай Д.И. Модель прогноза долговечности железобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 33. – Д.: Вид-во Дніпопетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 43–48

2. Бородай Д.И. Прогноз долговечности типовых железобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Сучасні будівельні матеріали. – Вип. 1 (87). – 2011. – С. 169–176.

3. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от корозии. – М.: Металлургия, 1981.- 281с.

4. 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.

5. Державний стандарт України ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» Мінрегіонбуд України, К.: 2009. – 50с.

6. Державні будівельні норми ДБН В.2.3-22 - 2009 "Мости і труби. Основні вимоги проектування".- Мінрегіонбуд України, К.: 2009.

7. ДСТУ-Н Б.В.1.3-23:2009 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів». - Мінрегіонбуд України, К.: 2009.

8. Лантух-Лященко А.І, Медведев К.В К вопросу определения граничного износа сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста. Вестник Харковского национального автомобильно-дорожного университета. Вып.58, Харьков, изд. ХНАДУ: 2012.- С. 90 – 95.

9. Лантух-Лященко А.І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації. Вісник Транспортної Академії України, № 3, Київ 1999. – с. 59 – 63

10. Лантух-Лященко А.І. Феноменологическая модель деградации элементов сооружений. Труды международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела», М.: МИИТ, 2006, с.259-265

11. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974. – 20с.

12. СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии, Госстрой СССР. – М.: ЦИТП. 1985.

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

14. 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

15. Яцко Ф.В. Прогноз довговічності залізобетонних елементів мостів. Статистичний підхід. Вісник Національного університету «Львівська політехніка», № 664, Львів: 2010, с. 371- 378

16. DuraCrete, Probabilistic Methods for Durability Design, Document BE95- 1347/R0, The European Union - Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda, 1999.

17. Reliability based Service Life Prediction of Concrete Bridge Superstructures. Proceeding “EKO MOST 2006. Durable bridge structures in the environment”, Kielce, 16-17 May 2006/ WARSZAWA 2006. – ISBN 83-89252-85-6: p.255-261

18. 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, pp. 381-400.

Рецензент д-р фіз.-мат. наук, професор Данчук В.Д.

Яцко Федір Володимирович магістр, асистент кафедри «Мости та тунелі», Національний транспортний університет, вул. Суворова 1, 01010 Київ, Україна, тел/факс +380442807978, ел. пошта fedor.yatsko@gmail.com

Yatsko Fedir Volodymyrovych magister, assistant department “bridges and tunnels”, National Transport University, Suvorova str. 1, 01010 Kyiv, Ukraine, phone +380442807978,
E-mail:fedor.yatsko@gmail.com