

## Выводы

1. Реализация криволинейного изопараметрического слоистого объемного конечного элемента позволяет учесть с одной стороны часть гипотез технической теории изгиба, с другой – соотношения общей механики. Это допускает использование деформационной теории пластичности для учета нелинейных свойств материала.

2. Методика расчета железобетонных плит с использованием предлагаемого конечного элемента позволяет судить о действительном характере их напряженно-деформированного состояния, достоверно прогнозировать трещиностойкость и жесткость на всех этапах нагружения, дает достаточно надежные результаты и может быть использована в их реальном проектировании.

## Литература

1. Зенкевич, О. *Метод конечных элементов в технике* / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1977. – 541 с.

2. Балан, Т.А. *Расчет анизотропных слоистых оболочек методом конечных элементов* / Т.А. Балан, О.В. Раздорожная // *Проблемы прочности*. – 1985. – № 7. – С. 103 – 108.

3. Клованич, С.Ф. *Численный эксперимент по исследованию деформационных теорий пластичности бетона* / С.Ф. Клованич, Д.И. Безушко // *Вестник Одесской госакадемии строительства и архитектуры*. – 2006, Вып. 22. – С. 122 – 130.

4. Клованич, С.Ф. *Модель прочности и деформаций бетона и грунта при сложном напряженном состоянии* / С.Ф. Клованич // *Строительные конструкции / межвед. науч.-техн. сб. Вып. 59. –К.: НИИСК, 2003. – С. 163 – 170.*

5. *Duddeck H. Material and time dependent non-linear behavior of cracks concrete slab* / H. Duddeck, G. Griebenon, G. Schaper // *Nonlinear behavior of reinforced concrete spatial structures. – V. 1. – Priliminary Report, IASS Symp., Darmstadt, 1978.*

Надійшла до редакції 08.12. 2010

© Д.И. Безушко, И.Н. Мироненко

## ВИКОРИСТАННЯ КРИВОЛІНІЙНОГО ІЗОПАРАМЕТРИЧНОГО ШАРУВАТОГО ОБ'ЄМНОГО СКІНЧЕННОГО ЕЛЕМЕНТУ У РОЗРАХУНКАХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ

*Наведено реалізацію криволінійного ізопараметричного шаруватого об'ємного скінченного елемента для розрахунку залізобетонних плит і оболонок з урахуванням фізично нелінійних властивостей матеріалу. Як тестове завдання розглянутий приклад розрахунку залізобетонної плити.*

**Ключові слова:** ізопараметричний шаруватий скінчений елемент, метод скінчених елементів, плити, залізобетон.

*D.I. Bezushko, Ph. Ds., I.N. Mironenko, Ph. Ds.  
Odessa national sea university*

## USE OF A CURVILINEAR ISOPARAMETRIC SANDWICH-TYPE VOLUMETRIC FINITE ELEMENT IN CALCULATIONS OF REINFORCED CONCRETE SLABS

*Realization curvilinear isoparametric sandwich-type volumetric finite element for calculation of reinforced concrete slabs and shells in view of physically nonlinear properties of material. As a test problem the example of calculation of reinforced concrete slabs is considered.*

**Keywords:** an isoparametric sandwich-type finite element, a method of finite elements, slabs, reinforced concrete.

## **ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ БАЛКОВИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА УМОВ КОРОЗІЇ БАГАТОЕЛЕМЕНТНОЇ АРМАТУРИ В НОРМАЛЬНІЙ ТРІЩИНІ**

*Запропоновано метод оцінювання залишкового ресурсу балкових залізобетонних конструкцій із багатоелементною арматурою, що експлуатуються в умовах агресивних середовищ, на основі контролю деяких електрохімічних параметрів.*

**Ключові слова:** залізобетонні балки, агресивне середовище, тріщини, залишковий ресурс.

**Постановка проблеми.** Експлуатація залізобетонних конструкцій у деяких виробничих будівлях відбувається в умовах досить агресивного середовища. Запроектвані й виготовлені відповідно до вимог нормативних документів, вони повинні бути стійкими до агресивної дії середовища. Але дефекти при виготовленні, ураження, особливо тріщини, сприяють початку і розвитку корозійних процесів у бетоні, арматурі. Надзвичайно небезпечною в балкових залізобетонних конструкціях є корозія розтягнутої арматури в тріщинах.

Такі конструкції потребують особливої уваги, періодичного моніторингу їх працездатності та оцінки залишкового ресурсу.

Тому оцінка залишкового ресурсу даних конструкцій є актуальною, враховуючи те, що з кожним роком таких конструкцій стає все більше.

**Аналіз останніх досліджень.** Довговічність залізобетону у зв'язку з корозійними явищами вивчається давно. Видані солідні монографії [1, 2]. У цих виданнях акцентується увага, головним чином, на корозії бетону залізобетонних конструкцій. У більш пізніх працях при розгляді ресурсу залізобетонних конструкцій вивчаються і корозійні втрати на арматурі.

Теорія розрахунку ресурсу залізобетонних конструкцій при корозії арматури в тріщинах бетону висвітлена в статті В.П. Чиркова [3], яка будується на поступовому накопиченні уражень у процесі експлуатації. Але при використанні даної теорії виникають проблеми з визначенням ступеня ураження арматури при обстеженні конструкцій.

Для забезпечення розрахункової довговічності залізобетонних конструкцій із тріщинами при їх роботі в агресивному середовищі в праці В.М. Мігунова [4] пропонується контролювати ширину тріщини при відомих діаметрах робочої арматури.

За допомогою критерію живучості, який характеризує залишковий ресурс, визначається доцільність підсилення ураженої конструкції в роботі С.М. Скоробогатова [5]. Величина резерву живучості відображає інтегральний результат накопичення уражень у бетоні.

При практичній реалізації розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій, запропонованого Ю.Б. Потаповим [6], залишковий ресурс визначався за динамікою замірів розкриття тріщини в бетоні. При цьому ширина розкриття тріщини пов'язується зі ступенем корозії арматури. Але точність даного підходу все ж таки залишається недостатньою.

У працях Ф.Х. Ахметзянова [7] також розглядається питання оцінки залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій, але запропонована модель ураховує тільки деградаційні процеси в бетоні.

Існують пропозиції з оцінки залишкового ресурсу на ймовірнісних показниках щодо відмови конструкції. Передумови для такої оцінки закладені в книгах А.С. Личова, В.П. Чиркова [8, 9], в статтях Ю.В. Краснощокова, М.В. Шавикіної [10, 11], С.Н. Леоновича [12]. Розглянуті в даних роботах методи відбивають загальні

підходи до визначення залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій в умовах дії агресивного середовища або потребують значних експериментальних досліджень для отримання статистичних характеристик деградаційних процесів у бетоні й арматурі в різних середовищах.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Більш конкретно методика розрахунку залишкового ресурсу згинальних залізобетонних конструкцій викладена в роботі [13]. Методика розроблена на чітких уявленнях про корозію арматури в нормальних тріщинах, але не дозволяє розрахувати залишковий ресурс для залізобетонних конструкцій із багатоелементною арматурою.

**Формулювання цілей роботи.** Метою даної роботи є отримання залежностей для розрахунку ресурсу балкових залізобетонних конструкцій із багатоелементною арматурою на основі замірів електрохімічних характеристик арматури при потраплянні агресивних розчинів у нормальні тріщини.

**Виклад основного матеріалу.** Відмова балкових залізобетонних конструкцій за несучою здатністю настане тоді, коли напруження в розтягнутій арматурі на площі перерізу, що залишилася після корозії, перевищить межу плинності арматурної сталі

$$\sigma_s > R_s, \quad (1)$$

де  $\sigma_s$  - напруження в арматурі від експлуатаційного навантаження;

$R_s$  - характеристика міцності арматури (межа плинності).

Для згинальних залізобетонних елементів нерівність (1) може бути записана так:

$$M_r - M_q > M_r - M_r [1 - v(t)], \quad (2)$$

де  $M_r$  – гранична несуча здатність конструкції на момент обстеження;

$M_q$  – згинальний момент, що діє на конструкцію під час експлуатації на момент обстеження;

$v(t) = \Delta A_s / A_s$  – відносна втрата площі перерізу розтягнутої арматури на момент оцінювання залишкового ресурсу.

Різниця між граничною несучою здатністю на момент обстеження  $M_r$  і розрахунковим зусиллям  $M_q$ , що діє на конструкцію під час експлуатації, створює запас несучої здатності, який можна взяти до уваги при розрахунках ресурсу згинальної конструкції з ураженою корозією арматурою в тріщинах.

У розгорнутому вигляді нерівність (2) буде такою:

$$R_s z_1 A_s - \sigma_s z_2 A_s > R_s z_1 A_s - R_s z_1 A_s [1 - v(t)]. \quad (3)$$

Нерівність (3) після перетворення набуде вигляду

$$1 - \frac{\sigma_s z_2}{R_s z_1} > 1 - [1 - v(t)],$$

або

$$1 - \frac{z_0}{m} > v(t), \quad (4)$$

де  $m = \frac{R_s}{\sigma_s}$  – коефіцієнт запасу напруження в арматурі;

$z_0 = \frac{z_2}{z_1}$  – відносне плече внутрішньої пари відповідно на момент обстеження  $z_2$  і при перебуванні конструкції в граничному стані  $z_1$ .

Як показано в роботі [14], відносна втрата площі перерізу одиночного арматурного стрижня може бути визначена за формулою

$$v(t) = \frac{2KI}{7,87\pi D_0^2 a_y} t, \quad (5)$$

де  $K$  – електрохімічний еквівалент, г/А год;

$I$  – струм корозійної гальванопари «арматура в тріщині – арматура під бетонним покриттям», А;

$D_0$  – початковий діаметр арматурного стрижня, см;

$a_y$  – довжина ділянки арматури під нормальною тріщиною, що підлягає ураженню, см;

$t$  – час корозії, год.

Реальні згинальні залізобетонні конструкції мають багатоеlementну розтягнуту арматуру. При рівних площах арматурних елементів відносна сумарна втрата площі перерізу при корозії в нормальній тріщині  $v_\Sigma$  буде складатися із втрат на окремих стрижнях, тобто

$$v_\Sigma = v \times n, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість однотипних арматурних стрижнів.

Багатоеlementна робоча арматура може складатися із стрижнів різних діаметрів. Частіш за все багатоеlementна робоча арматура може складатися із двох різних сортamentів арматурних стрижнів, які відрізняються за швидкістю втрати перерізу при корозії арматури у тріщині.

У даному випадку відносні сумарні втрати площі перерізу будуть

$$v_\Sigma = \left( \frac{2KI t}{7,87\pi a_y n_1 / D_1^2} \right) + \left( \frac{2KI t}{7,87\pi a_y n_2 / D_2^2} \right), \quad (7)$$

де  $n_1$  – кількість арматурних стрижнів діаметром  $D_1$ ;

$n_2$  – кількість арматурних стрижнів діаметром  $D_2$ .

Після підстановки  $v_\Sigma$  у формулу (4) отримаємо

$$1 - \frac{z_0}{m} > \left[ \frac{2KI}{7,87\pi a_y n_1 / R_1^2} + \frac{2KI}{7,87\pi a_y n_2 / D_2^2} \right] t. \quad (8)$$

Користуючись нерівністю (8), замінивши  $t$  на  $T$ , можна одержати граничний час експлуатації конструкції при корозії арматури в тріщині

$$T = \frac{1 - \frac{z_0}{m}}{\left[ \frac{2KI}{7,87\pi a_y n_1 / R_1^2} + \frac{2KI}{7,87\pi a_y n_2 / D_2^2} \right]}. \quad (9)$$

Значення струму гальванопари може бути отримано після замірів необхідних електрохімічних параметрів на реальній конструкції за формулою [15]

$$I = \frac{2\gamma(E_a - E_k)}{\pi} \sum_{k=1}^3 \frac{1 - \cos 2 \frac{\pi k a}{c}}{k \left( 1 + \frac{\pi k L}{c} \right)}, \quad (10)$$

де  $E_a$ ,  $E_k$  – стаціонарні потенціали металу арматури в тріщині та під бетонним покриттям, В;

$\gamma$  – питома електропровідність агресивного розчину, Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>;

$a$  – половина ширини розкриття нормальної тріщини в перерізі, що досліджується, см;

$c$  – довжина катодної ділянки (половина відстані між нормальними тріщинами), см;

$L = \gamma \times b$  характеризує поляризацію металу арматури, см;

$b$  – коефіцієнт поляризації металу арматури у даному середовищі, Ом<sup>2</sup>см<sup>2</sup>.

**Приклад.** Залізобетонна балка має прямокутний переріз розмірами  $h=178$ ,  $b=121$ ,  $a=20$ . Розтягнута арматура класу А1 ( $R_s=225$  МПа); проектна площа перерізу арматури  $A_s=207,3$  мм<sup>2</sup>, ( $2\emptyset 10$ ,  $A_s=157$  мм<sup>2</sup> і  $1\emptyset 8$ ,  $A_s=50,3$  мм<sup>2</sup>). Бетон важкий класу В25 ( $R_b=15$  МПа,  $R_{bt,ser}=1,4$  МПа);  $\gamma_{b2} = 0,9$  (короткодіюче навантаження відсутнє). Діюче навантаження  $M_{exp}=5$  кНм.

Балка має магістральну нормальну тріщину посередині прольоту,  $a_m=0,5$  мм, яка постійно заповнена технологічними проливами – розчином хлористого натрію, що призводить до корозії арматури у тріщині. В даних умовах балка експлуатується протягом 5

років, і подальші умови експлуатації не змінюються. Необхідно визначити залишковий ресурс залізобетонної балки.

Результати обстежень такі. Потенціал арматури відносно мідно-сульфатного електрода порівняння складає: на анодній ділянці (над тріщиною) – 700 мВ, на катодній ділянці (за тріщиною) – 400 мВ.

Питома електропровідність агресивного розчину  $\gamma_n = 0,0670 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ; анодна поляризація арматури  $b_a = 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ .

Довжина анодної ділянки  $a_y = 5 \text{ мм}$  (при  $a_{cr} = 0,5 \text{ мм}$ ); довжина катодної ділянки  $c = 70 \text{ мм}$ .

За даними електрохімічними показниками струм макрогальванічної корозійної пари, розрахований за формулою (10), складає  $2,32 \times 10^{-5} \text{ А}$ .

*Визначення відносної втрати перерізів арматури за 5 років експлуатації у даних умовах*

Відносна сумарна втрата площі перерізу обчислюється за формулою (7)

$$v_{\Sigma} = \frac{2KI t}{7,87 \rho_a} \left( \frac{D_1^2}{n_1} + \frac{D_2^2}{n_2} \right) = \frac{2 \times 1,0424 \times 0,0000232 \times 5 \times 365 \times 24}{7,87 \times 3,14 \times 0,5} \left( \frac{1^2}{2} + \frac{0,8^2}{1} \right) = 0,195.$$

Площа перерізу арматури через 5 років буде

$$A_{s1} = A_s - v A_s = 207,3 - 0,195 \times 207,3 = 166,9 \text{ мм}^2.$$

*Розрахунок залишкового ресурсу за умови забезпечення міцності балки*

Розрахунок виконуємо згідно з п.3.15 СНиП при допущенні, що стиснена арматура за розрахунком не враховується.

$$\text{Висота стисненої зони бетону балки } x = \frac{R_s A_s}{R_b b} = \frac{225 \times 166,9}{15 \times 121} = 20,7 \text{ мм}.$$

Плече внутрішньої пари сил при  $h_0 = 178 - 20 = 158 \text{ мм}$  буде  $z_1 = h_0 - 0,5x = 158 - 0,5 \times 20,7 = 147,7 \text{ мм}$ .

Із табл. 18 СНиП для елементів із бетону В25 з арматурою класу А1 при  $\gamma_{b2} = 0,9$  знаходимо  $\xi_R = 0,652$ .

$$\text{Оскільки } \xi = \frac{x}{h_0} = \frac{20,7}{158} = 0,131 < \xi_R = 0,652, \text{ міцність визначаємо з умов (17)}$$

$$\text{СНиП } M_p = R_s A_{s\Sigma} (h_0 - 0,5x) = 225 \times 166,9 \times 147,7 \approx 5,55 \text{ кНм}.$$

Таким чином, балка за міцністю має ресурс ( $M_p > M_{\text{exp}}$ ).

Розраховуємо напруження в розтягнутій арматурі при дії експлуатаційного навантаження.

$$\psi_s = 1,25 - \varphi_{ls} \varphi_m = 1,25 - 1 \times 0,35 = 0,9; W_{pl} = \frac{bh^2}{3,5} = \frac{12,1 \times 17,8^2}{3,5} = 1095,36 \text{ см}^3;$$

$$\varphi_m = \frac{R_{bt,ser} W_{pl}}{M_{\text{exp}}} = \frac{160 \times 1095,36}{5 \times 10^5} = 0,35;$$

$$\xi = \frac{1}{\beta + \frac{1 + 5(\delta + \lambda)}{10 \mu \alpha_s}} = \frac{1}{1,8 + \frac{1 + 5 \times 0,0089}{10 \times 0,0077 \times 7,8}} = 0,28;$$

$$\lambda = \varphi_l \left(1 - \frac{h_l}{2h_0}\right) = 0; \varphi_l = 0; \beta = 1,8; \delta = \frac{M_{\text{exp}}}{bh_0^2 R_{b,ser}} = \frac{5 \times 10^5}{121 \times 158^2 \times 18,5} = 0,0089;$$

$$\mu = \frac{A_{s1}}{bh} = \frac{166,9}{121 \times 178} = 0,0077; \alpha_s = \frac{E_s}{E_b} = \frac{21 \times 10^4}{27 \times 10^3} = 7,8;$$

$$z_2 = h_0 \left[1 - \frac{\xi^2}{2\xi}\right] = 158 \left[1 - \frac{0,28^2}{0,56}\right] = 135,9 \text{ см}$$

$$\sigma_s = \psi_s M_{\text{exp}} / A_{s1} z_2 = 0,9 \times 5 \times 10^5 / 1,67 \times 13,59 = 19827,9 \text{ Н / см}^2 = 198,3 \text{ МПа}$$

Розрахунок залишкового ресурсу за формулою (9)

$$T = \frac{1 - \frac{z_0}{m}}{\left[ \frac{2KI}{7,87 \pi a_y n_1 / R_1^2} + \frac{2KI}{7,87 \pi a_y n_2 / D_2^2} \right]} = \frac{1 - \frac{0,92}{1,134}}{\left[ \frac{2 \times 1,0424 \times 0,0000232}{7,87 \times 3,14 \times 0,5} \left( \frac{1^2}{2} + \frac{0,8^2}{1} \right) \right]} =$$

$$= 42582 \text{ днів} = 4,86 \text{ років},$$

де  $z_0 = \frac{z_2}{z_1} = \frac{135,9}{147,7} = 0,92$ ;  $m = \frac{R_s}{\sigma_s} = \frac{225}{198,3} = 1,134$ ;  $I = 2,32 \times 10^{-5} \text{ А}$

**Висновки.** Отримана залежність для визначення залишкового ресурсу балкових залізобетонних конструкцій з багатоеlementною арматурою, що експлуатуються з нормальними тріщинами в агресивному середовищі.

#### Література

1. Коррозия бетона и железобетона. Методы защиты / [Москвин В.М., Иванов Ф.И., Алексеев С.М., Гузев Е.А.]. – М.: Стройиздат, 1980. – 526 с.
2. Основы теории проектирования строительных конструкций. Железобетонные конструкции: [учебное пособие] / [В.П. Чирков, В.И. Ключин, В.С. Федоров, Я.И. Швидко]. – М.: УМК МПС РФ, 1999. – 371 с.
3. Чирков В.П. Оценка ресурса железобетонных конструкций при коррозии арматуры / В.П. Чирков, А.Н. Кардангушев // Изв. вузов. Строительство. – 1992. – №3. – С.3 – 9.
4. Мигунов В.Н. Влияние внутренних факторов железобетонных конструкций на коррозионную стойкость арматуры классов А-1 и А-111 в трещинах бетона / В.Н. Мигунов // Изв. вузов. Строительство. – 2001. – №11. – С.125 – 129.
5. Скоробогатов С.М. Рекомендации по определению резерва живучести для железобетонных конструкций, поврежденных нагрузкой неизвестной величины / С.М. Скоробогатов // Изв. вузов. Строительство. – 1998. – №6. – С.4 – 8.
6. Потапов Ю.Б. Расчет долговечности железобетонных конструкций с учетом коррозии арматуры / Ю.Б. Потапов, П.А. Головинский, Г.Д. Шмелева // Изв. вузов. Строительство. – 2003. – №6. – С.113 – 117.
7. Ахметзянов Ф.Х. К оценке остаточного ресурса железобетонных конструкций при накоплении повреждений / Ф.Х. Ахметзянов // Изв. вузов. Строительство. – 1992. – №2. – С.6 – 9.
8. Лычев А.С. Вероятностная оценка остаточного ресурса строительной конструкции и резерва ее прочности / А.С. Лычев // Изв. вузов. Строительство. – 1996. – №7. – С.123 – 126.
9. Чирков В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных материалов конструкций / В.П. Чирков. – М.: Маршрут, 2006. – 620 с.
10. Краснощеков, Ю.В. Оценка надежности железобетонных элементов покрытий / Ю.В. Краснощеков // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – №9. – С.23 – 25.
11. Шавыкина М.В. Оценка сроков службы железобетонных конструкций при коррозии арматуры / М.В. Шавыкина // Бетон и железобетон. – 2006. – №5. – С.26–31.
12. Леонович С.Н. Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии / С.Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. трудов VII Международного научно-методического семинара. – Брест: БГТУ, 2001. – С. 435 – 440.

13. Степова О.В. Оцінка залишкового ресурсу згинальних залізобетонних конструкцій при корозії арматури в нормальних тріщинах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / О.В. Степова. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – 24 с.

14. Бондар Л.В. Розрахунок втрати площі перерізу розтягнутої арматури при її корозії в нормальній тріщині балкових залізобетонних конструкцій /Л.В. Бондар, О.В. Степова // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб., Серия: технические науки. – Харьков, 2009. – Вып.88. – С. 29 – 34.

15. Бондар В.О. Математичне моделювання корозії залізобетонних конструкцій в тріщинах транспортних споруд / В.О. Бондар, О.В. Степова // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Современные технологии и материалы в дорожном хозяйстве». – Харьков: ХНАДУ, 2006. – С.48 – 52.

Надійшла до редакції 22.04. 2011

© Е.В.Степовая

## **ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА БАЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УСЛОВИИ КОРРОЗИИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ АРМАТУРЫ В НОРМАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЕ**

*Предлагается метод оценки остаточного ресурса балочных железобетонных конструкций с многоэлементной арматурой, эксплуатирующихся в условиях агрессивных сред, на основе контроля некоторых электрохимических параметров.*

**Ключевые слова:** железобетонные балки, агрессивная среда, трещины, остаточный ресурс.

## **EVALUATION OF THE RESIDUAL RESOURCES OF THE FLEXIBLE REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS HAVING CORROSION OF THE FERRO-CONCRETE REINFORCEMENT IN THE NORMAL CRACK**

*It is proposed the method of assessment of remaining life of the reinforced concrete constructions, that are exploited with cracks in the conditions of the ingress of aggressive solutions.*

**Keywords:** reinforced-concrete beams, corrosive environment, cracks, remaining life.