

ОСНОВНІ СТОХАСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРИ ОЦІНЮВАННІ НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ ДОДАТКОВИМ АРМУВАННЯМ

© Титаренко Р. Ю., Хміль Р. Є., 2017

Сьогодні існує велика кількість наукових і технічних знань, завдяки яким будівництво стало надійним, швидким та економічним. Удосконалення методів розрахунку дає можливість науковцям і проєктантам створювати ефективні конструкції із заданим (доцільним) рівнем надійності, який безпосередньо впливає на кількість необхідних матеріалів і, відповідно, вартість майбутніх будівельних об'єктів загалом. У цій статті запропоновано аналітичну методику розрахунку показників оцінки надійності залізобетонних балок, підсиленних способом нарощування основного перерізу додатковою арматурою. Розроблена методика дозволяє враховувати з достатньо високою точністю ряд стохастичних параметрів (факторів), які ґрунтуються на експериментальних даних попередніх досліджень і тією чи іншою мірою впливають на фактичну роботу залізобетонних конструкцій в процесі їх експлуатації.

Ключові слова: надійність, безпека, ймовірність відмови, стохастичний параметр, підсилення, залізобетонна балка, методика.

R. Tytarenko, R. Khmil

Lviv Polytechnic National University,
Department of building construction and bridges

THE BASIC STOCHASTIC PARAMETERS IN ASSESSING OF THE RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED BY ADDITIONAL REINFORCEMENT BARS

© Tytarenko R., Khmil R., 2017

Today there are many scientific and technical knowledge that make construction a reliable, fast and economical. To provides a safe and durable (the fundamental components of reliability) of buildings and structures are developed the methods of reliability theory. Improving the methods of calculation is enables researchers and designers to create effective structures with a preset (expedient) level of reliability, which directly affects to an amount of required materials and, appropriately, a cost of future building objects in general. In this paper the simple analytical method of calculation of indexes for assessing of reliability of reinforced concrete (RC) beams, strengthened with additional reinforcement bars is proposed. The developed method takes into account with a sufficiently high accuracy the number of the stochastic parameters (factors), based on the experimental data of previous investigations, and in any case affects on the actual work of RC structures during their operation. In addition, the list of scientific publications and normative literature, used in writing this article, is posted.

Key words: reliability, safety, probability of failure, stochastic parametr, strengthening, reinforced concrete beam, methodology

Постановка проблеми. На теперішній час підсилення різноманітних будівельних конструкцій є дуже актуальною науковою проблемою, насамперед, через економічну складову. Зростання темпів будівництва по всьому світу, зокрема й в Україні, а також активне впровадження

в практику підсилення конструкцій нових ефективних і, головне, швидкокомпонуючих матеріалів веде за собою раціональне використання існуючих будівель, елементи яких після переоснащення, відновлення чи реконструкції повністю б відповідали нинішнім стандартам і нормам проектування.

Своєю чергою, згадані чинні українські та європейські норми проектування [1, 2], які регламентують вимоги до розрахунку і проектування залізобетонних конструкцій будівель та споруд, формально не розглядають можливості виникнення аварій внаслідок стохастичних властивостей параметрів несучої здатності, діючих навантажень, а також геометричних розмірів конструктивних елементів. Крім того, метод граничних станів, концепція якого покладена в основу норм, не дозволяє провести кількісну оцінку надійності конструкцій і, тим більше, проектувати їх із заданим рівнем надійності. При цьому, коли безпосередній розрахунок показників надійності відсутній, можливе неврахування повною мірою сполучень розрахункових навантажень, що веде до проектування конструкцій з завищеною надійністю. Також, що значно гірше, існують випадки, коли застосування нормативної системи часткових коефіцієнтів надійності може призвести до того, що надійність елементів відповідальних будівель та споруд виявиться нижчою за надійність конструкцій будівель та споруд класу наслідків СС3 [5].

На основі цього можна констатувати, що розрахунок конструкцій як систем, що містять випадкові параметри, слід вести в ймовірнісній постановці на основі методів теорій ймовірностей та випадкових функцій. При цьому, гарантія ненастання граничного стану певного елемента будівлі чи споруди може бути забезпечена з визначеною ймовірністю – ймовірністю безвідмовної роботи.

Основними ж недоліками і перешкодами впровадження теорії надійності в практику проектування є складність математичного апарату, який використовується для вирішення задач, а також достатньо високий рівень суб'єктивності в трактуванні і введенні в ймовірнісний розрахунок тих чи інших стохастичних параметрів. Тому розроблення та впровадження в практику проектування і реконструкції методики, яка б максимально об'єктивно оцінювала фактичний рівень надійності залізобетонних балок після підсилення є дуже важливою і актуальною задачею для науковців.

В основу поданих нижче теоретичних досліджень покладена існуюча методика теорії надійності непідсилених будівельних конструкцій [3], [4], [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням питання надійності підсилених залізобетонних конструкцій розпочали активно займатися від початку ХХІ століття, насамперед беручи до уваги ефективність самих методів підсилення, а також збільшення обсягів робіт з відновлення та реконструкції несучих елементів будівель та споруд по всьому світу. Серед науковців, які працюють над розробленням та вдосконаленням методів оцінки надійності підсилених сталевих, залізобетонних і сталезалізобетонних конструкцій виокремимо С. Г. Альсаєда, Х. А. Барроса, Б. Р. Еллінгвуда, А.-Х. Цюрейка, В. М. Кербхері, Дж. Р. Касас, Е. Фер'єра, Дж. Веселека, С. Ф. Пічугіна, О. П. Семка, О. В. Воскобійник та ін. Але сьогодні дуже мало досліджень, які б стосувалися оцінки надійності залізобетонних згинаних елементів, підсилених при дії навантаження (тобто на рівні визначення фактичної несучої здатності конструкції в момент виконання підсилення), а також не розроблено методик, які б дозволяли враховувати рівень навантаження, при якому виконуватиметься підсилення, як випадковий параметр.

На нашу думку, найцікавіше і найповніше дослідження, проведене сьогодні (з погляду врахування включення в роботу окремих елементів підсиленої залізобетонної конструкції, а також підходу до оцінки її надійності) описане в праці [6] професорів Б. Р. Еллінгвуда та А.-Х. Цюрейка з Технологічного Інституту Джорджії (Атланта, США). Ці вчені запропонували методику оцінки надійності згинаних залізобетонних елементів, підсилених за допомогою FRP-композитів. Найважливішою цінністю цієї методики є те, що застосована вона до підсилених залізобетонних елементів, які мають недостатню міцність на згин (дослідження стосувалися міцності нормальних перетинів). Цей фактор надає роботі [6] виняткову актуальність для застосування її результатів у реальних умовах реконструкції згинаних залізобетонних елементів. Більше того, для оцінки надійності підсилених конструкцій тут попередньо були проведені дослідження не тільки залізобетонних балок, як згинаних елементів, а й плит (рис. 1).



Рис. 1. Характер типових порушень зчеплення FRP-композитів і залізобетонних плит після досягнення граничного стану комплексної підсиленої конструкції [6]

Тези публікації [6] наочно продемонстрували можливість розроблення методики оцінки надійності підсиленних згинаних залізобетонних елементів на основі досягнення граничного стану комплексного перерізу відповідно до американських норм проектування [7]. Своєю чергою, закріплені при дії навантаження до нижніх граней великопролітних балок та плит FRP-пластини включаються в роботу конструкції на певному етапі та збільшують її міцність та деформативність. Оцінювання надійності автори проводили для наступних попередньо встановлених можливих відмов: текучості поздовжньої робочої арматури, роздроблення стиснутої зони бетону або ж порушенні зчеплення вуглепластикової пластини.

Припустивши, що внаслідок зміни умов експлуатації конструкції номінальне змінне навантаження збільшиться на 50 %, до нижньої грані експериментальних залізобетонних балок додавались FRP-пластини (див. рис. 2), щоб забезпечити необхідну несучу здатність. При цьому було також припущено, що в момент підсилення на балку діятиме тільки постійне навантаження. Необхідна міцність комплексного перерізу при згині досягалась склеюванням двох шарів FRP-пластин до нижньої грані залізобетонної балки. Аналіз надійності, що проводився після випробувань згідно ймовірнісного методу Монте-Карло як для непідсиленних, так і для підсиленних згинаних елементів, базувався на вибірці статистичних даних (які відображали стохастичні параметри матеріалів) попередніх досліджень, що стосувалися визначення ймовірностей відмов конструкцій. Надійність підсиленних конструкцій (як балок, так і плит), передусім, залежала від якості монтажу FRP-пластин та виражалася через критерій – показник (індекс) надійності β .

Загалом, роботу [6] можна назвати дуже цінною у сфері дослідження надійності згинаних залізобетонних елементів, підсиленних при дії навантаження за допомогою FRP-пластин, оскільки вона дає методику визначення основного критерію оцінки надійності – індексу надійності β . Недоліки тут можна виокремити такі: розроблена методика адаптована до американських норм проектування; геометричні розміри згинаних елементів і рівень навантаження на момент підсилення тут не розглядали як змінні параметри. До того ж, в запропонованій теорії розглянуто один (близький до граничного) рівень навантаження, при якому здійснювали підсилення.

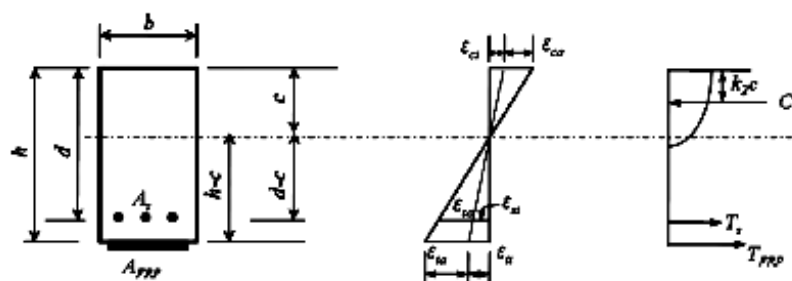


Рис. 2. Пружні деформації, напруження і результуючі сили в залізобетонній балці, підсиленій FRP-пластиною [6]

Окремі дослідження в галузі надійнісного проектування підсиленних конструкцій стосувались розроблення методик аналізу надійності згинаних конструкцій залізобетонних мостів (у вигляді

знаходження розрахункових факторів безпеки) [8]; оцінки надійності самих матеріалів підсилення (зволожених вуглецю та епоксидного клею) щодо довготривалого погіршення багатьох їхніх характеристик (так званий статистичний метод прогнозування) [9]; спрощеного аналізу надійності підсиленних залізобетонних балок з недостатньою міцністю на зсув [10]; дослідження проектного й фактичного рівня безвідмовності різних типів сталезалізобетонних конструкцій (СЗБК) на всіх етапах їхнього життєвого циклу [11].

Отже, в усіх згаданих вище наукових публікаціях якісно описано побудову алгоритмів оцінок надійності різноманітних непідсиленних і підсиленних конструкцій, проте не враховано випадкової природи фактичного рівня навантаження при виконанні підсилень, а також геометричних параметрів досліджуваних конструктивних елементів.

Метою та завданням дослідження є розроблення методики оцінки надійності залізобетонних балок, підсиленних нарощуванням перерізу додатковою стрижневою арматурою.

Теоретичні обґрунтування. Для вирішення поставлених мети і завдання дослідження необхідно встановити числові характеристики прийнятих випадкових параметрів: математичні очікування, дисперсії тощо. Крім того, встановлюючи згадані вище числові характеристики, існує можливість використання експериментальних даних інших дослідників.

При цьому, враховуємо той факт, що переважна більшість випадкових параметрів резерву несучої здатності залізобетонних балок описується нормальним законом їх розподілу (розподілом Гауса). До таких стохастичних параметрів можна віднести міцність бетону, сталеві та композитної арматури, певну частину діючих навантажень (наприклад, постійних) і т.д. У чинних нормах проектування залізобетонних конструкцій [1] випадкова природа міцності бетону і арматури враховується введенням в розрахунок “характеристичної міцності” з гарантованою 95 %-ю забезпеченістю (довірчою ймовірністю).

Нормальний закон розподілу відіграє дуже важливу роль у теорії ймовірностей і займає серед інших законів розподілу особливе положення. Головною особливістю цього закону, яка виділяє його серед інших, є та, що він є граничним законом, тобто таким, до якого наближаються інші закони розподілу. Суму достатньо великої кількості незалежних (або малозалежних) стохастичних величин, які підлягають будь-яким законам розподілу, наближено можна описати нормальним законом, і це виконується то точніше, що більша кількість стохастичних величин сумується [5].

Міцність окремих матеріалів конструкцій, яка визначається експериментальним шляхом за стандартною методикою, має значний розкид і, відповідно, є випадковим параметром (статистичний характер міцності). Звідси випливає, що крива розподілу міцності є асиметричною, а також обмежена знизу нульовим значенням. Наближено приймаємо, що міцність матеріалів (бетону і сталеві арматури) розподілена згідно із нормальним законом.

Оцінку надійності проводили методом статистичної лінеаризації. В практиці проектування часто трапляються випадки, коли функція випадкових величин, яка досліджується, не є строго лінійною, проте майже не відрізняється від такої і при вирішенні задачі може наближено розглядатися як лінійна. Таке припущення має місце в тому випадку, коли випадкові зміни параметрів є незначними (до 25 %). Величина статистичної мінливості стохастичних параметрів будівельних конструкцій відповідає цим вимогам [5].

Для обчислення статистичних характеристик таких функцій здійснюється їх лінеаризація шляхом розкладу в ряд Тейлора в околиці центру розподілу випадкових аргументів (в точці математичного очікування випадкової функції) [5].

Теоретичні дослідження. Отже, на основі наведених вище припущень запропоновано методику оцінки надійності підсиленних залізобетонних згинаних елементів. Для розробки алгоритму оцінки надійності балок, підсиленних нарощуванням основного перерізу додатковою стрижневою арматурою, прийнято такі основні випадкові параметри системи:

- міцність бетону $\tilde{f}_{ck,prism}$; – міцність арматурної сталі \tilde{f}_{yk} ; – корисна висота перерізу \tilde{d} ;
- ширина перерізу \tilde{b} .

Випадкове значення граничного згинального моменту, що сприймається балкою з одиночним армуванням, підсиленою додатковою арматурою:

$$\tilde{M}_{ult} = f(\mathcal{S}_b, \mathcal{S}_s, \mathcal{S}_{s,add}, \tilde{d}, \tilde{d}', \tilde{b}) = \mathcal{S}_{s,add} \cdot A_{s,add} \cdot (\tilde{d}' - 0,5 \cdot \tilde{x}) + \mathcal{S}_s \cdot A_s \cdot (\tilde{d} - 0,5 \cdot \tilde{x}), \quad (1)$$

де $\mathcal{S}_b, \mathcal{S}_s, \mathcal{S}_{s,add}, \tilde{d}, \tilde{d}', \tilde{b}$ – випадкові значення розрахункових параметрів системи; $A_{s,add}$ – площа перерізу додаткової арматури; \tilde{d}' – відстань від верхньої грані балки до центру ваги додаткової арматури; \tilde{x} – висота стиснутої зони бетону, яка в даному випадку рівна

$$\tilde{x} = \frac{\mathcal{S}_{s,add} \cdot A_{s,add} + \mathcal{S}_s \cdot A_s}{\mathcal{S}_b \cdot \tilde{b}}. \quad (2)$$

Підставляємо вираз для \tilde{x} в формулу згинального моменту:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{ult} &= \mathcal{S}_{s,add} \cdot A_{s,add} \cdot \left(\tilde{d}' - 0,5 \cdot \frac{\mathcal{S}_{s,add} \cdot A_{s,add} + \mathcal{S}_s \cdot A_s}{\mathcal{S}_b \cdot \tilde{b}} \right) + \\ &+ \mathcal{S}_s \cdot A_s \cdot \left(\tilde{d} - 0,5 \cdot \frac{\mathcal{S}_{s,add} \cdot A_{s,add} + \mathcal{S}_s \cdot A_s}{\mathcal{S}_b \cdot \tilde{b}} \right) = \\ &= \mathcal{S}_{s,add} \cdot A_{s,add} \cdot \tilde{d}' + \mathcal{S}_s \cdot A_s \cdot \tilde{d} - \frac{0,5}{\mathcal{S}_b \cdot \tilde{b}} \cdot (\mathcal{S}_{s,add} \cdot A_{s,add} + \mathcal{S}_s \cdot A_s)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Математичне очікування граничного згинального моменту \bar{M}_{ult} одержимо, підставивши в отриманий вище спрощений вираз математичні очікування прийнятих випадкових аргументів.

Далі визначаємо коефіцієнти для знаходження стандарту граничного згинального моменту підсиленої балки \bar{M}_{ult} – у вигляді часткових похідних функції $\bar{M}_{ult} = f(x_1, \dots, x_n)$ за змінними $x_1 \dots x_n$:

$$D_b = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial \mathcal{S}_b}; \quad D_s = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial \mathcal{S}_s}; \quad D_{s,add} = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial \mathcal{S}_{s,add}}; \quad D_d = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial \tilde{d}}; \quad D_{d'} = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial \tilde{d}'}; \quad D_b = \frac{\partial \bar{M}_{ult}}{\partial \tilde{b}}. \quad (4)$$

Числові ж значення коефіцієнтів отримуємо, підставляючи в отримані вище вирази математичні очікування випадкових аргументів.

Стандарт граничного згинального моменту тут визначається як

$$\hat{M}_{ult} = \sqrt{(D_b \cdot \mathcal{S}_b)^2 + (D_s \cdot \mathcal{S}_s)^2 + (D_{s,add} \cdot \mathcal{S}_{s,add})^2 + (D_d \cdot \tilde{d})^2 + (D_{d'} \cdot \tilde{d}')^2 + (D_b \cdot \tilde{b})^2}. \quad (5)$$

Для оцінки надійності балки попередньо обчислюємо характеристику безпеки (індекс надійності), яка в цьому випадку має такий вигляд:

$$b = \frac{\bar{M}_{ult} - M_{cal}}{\hat{M}_{ult}}, \quad (6)$$

де M_{cal} – розрахункове значення зовнішнього згинального моменту в балці.

Насамкінець, встановлення оцінки надійності балки (у вигляді ймовірності її відмови) проведемо за допомогою функції Лапласа $\Phi(b)$:

$$Q(Y \leq 0) = 0,5 - \Phi(b). \quad (7)$$

Значення ж функції Лапласа від значення аргументу β можна визначити за допомогою формули "=НОРМСТРАСП(β)–0,5" програми "Microsoft Excel".

Висновки. На цьому етапі досліджень розроблено відносно просту аналітичну методику обчислення ряду показників для оцінки надійності залізобетонних балок (у вигляді ймовірностей їх відмов), підсиленних додатковою стрижневою арматурою. Ця методика розрахунку надійності дозволяє враховувати такі стохастичні параметри:

- 1) міцність бетону й арматурної сталі (мінливість параметрів міцності);
- 2) ширина та корисна висота перерізу (мінливість геометричних параметрів).

Наступним завданням даного дослідження є врахування в розробленій методиці оцінювання надійності стохастичного параметра рівня навантаження при якому виконують підсилення.

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. – (Національний стандарт України). 2. Eurocode: Basis of structural design. EN 1990:2002. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2002. – 87 p. 3. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009 – [Чинний від 2009-12-01] – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с. – (Національний стандарт України). 4. Пичугин С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: Монография. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 456 с. 5. Пшеничкина В. А. Надежность строительных систем: учебное пособие / В. А. Пшеничкина, А. Н. Богомолов, А. А. Чураков. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. – 40 с. 6. Wang N. Y. Reliability-Based Evaluation of Flexural Members Strengthened with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites / N. Y. Wang, B. R. Ellingwood, A. H. Zureick // Journal of Structural Engineering-ASCE. – 2010. – Vol. 136. – P. 1151–1160. 7. American Concrete Institute (ACI) ACI 318-05: Building code requirements for reinforced concrete. – ACI, Farmington Hills, MI, 2005. – 369 p. 8. Trentin C. Safety factors for CFRP strengthening in bending of reinforced concrete bridges / C. Trentin, J. R. Casas // Composite Structures. – 2015. – Vol. 128. – P. 188–198. 9. Karbhari V. M. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening / V. M. Karbhari, M. A. Abanilla // Composites Part B: Engineering. – 2007. – No. 1, Vol. 38. – P. 10–23. 10. Alsayed S. H. Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips / S. H. Alsayed, N. A. Siddiqui // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 42. – P. 238–247.

References

1. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia [Construction of houses and buildings. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions]. (2011). DBN V.2.6-98:2009 from 1st July 2011. Kyiv: Building norms of Ukraine [in Ukraine]. 2. Eurocode: Basis of structural design. EN 1990:2002. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2002. – 87 p. 3. Systema zabezpechennia nadiynosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Zakhalni pryncypy zabezpechennia nadiynosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktsiy ta osnov [System of providing of reliability and safety of structural objects. General principles of providing of reliability and constructive safety of buildings, structures, building constructions and foundations]. (2009). DBN V.1.2-14-2009 from 1st December 2009. Kyiv: Building norms of Ukraine [in Ukraine]. 4. Pichugin S. F. Nadozhnost stalnykh konstruktsyy proizvodstvennykh zdaniy: Monographia [Reliability of Steel Structures of Industrial Buildings: Monograph]. – М.: Publishing house ASV, 2011. – 456 p. 5. Pshenichkina V. A. Nadozhnost sroitelnykh sistem: uchebnoe posobie [Reliability of building systems: tutorial] / V. A. Pshenichkina, A. N. Bogomolov, A. A. Churakov. – Volgograd: VolgGASU, 2010. – 40 p. 6. Wang N. Y. Reliability-Based Evaluation of Flexural Members Strengthened with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites / N. Y. Wang, B. R. Ellingwood, A. H. Zureick // Journal of Structural Engineering-ASCE. – 2010. – Vol. 136. – P. 1151–1160. 7. American Concrete Institute (ACI) ACI 318-05: Building code requirements for reinforced concrete. – ACI, Farmington Hills, MI, 2005. – 369 p. 8. Trentin C. Safety factors for CFRP strengthening in bending of reinforced concrete bridges / C. Trentin, J. R. Casas // Composite Structures. – 2015. – Vol. 128. – P. 188–198. 9. Karbhari V. M. Design factors, reliability, and durability prediction of wet layup carbon/epoxy used in external strengthening / V. M. Karbhari, M. A. Abanilla // Composites Part B: Engineering. – 2007. – No. 1, Vol. 38. – P. 10–23. 10. Alsayed S. H. Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips / S. H. Alsayed, N. A. Siddiqui // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 42. – P. 238–247.