

РОЗРАХУНКОВА НАДІЙНІСТЬ НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ЩО ЗАЗНАЮТЬ ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ ПОВТОРНИХ І ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

CALCULATED RELIABILITY OF DISTINCTIVE REINFORCED CONCRETE BEAMS SUBJECTED TO LOW-CYCLE REPEATED AND SIGNIFICANTLY VARIABLE LOADS

Масюк Г.Х., к.т.н., проф. ORCID ID:0000-0001-5207-3111 (Національний університет водного господарства та природокористування), **Ющук О.В.**, к.т.н., інженер-конструктор, ORCID ID:0000-0001-6266-3445 (ТОВ «Архідельта»), **Сасовський Т.А.**, к.т.н., викладач, ORCID ID: 0000-0002-7344-7968 (Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський фаховий коледж Національного університету біоресурсів та природокористування України»).

Masjuk G.H., Ph.D., prof. ORCID ID:0000-0001-5207-3111 (National University of Water and Environmental engineering, Rivne), **Yushchuk O.V.**, Ph.D., engineer, ORCID ID:0000-0001-6266-3445 (LCC. Archidelta), **Sasovskiy T.A.**, lecturer, ORCID ID: 0000-0002-7344-7968 (Separated structural subdivision “Rivne College National University of Lifeand Environmental Sciences of Ukraine”)

На основі експериментально-теоретичних досліджень роботи нерозрізних залізобетонних балок за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень проведено аналіз оцінки їх надійності. Використовуючи експериментальні результати досліджень виконаний числовий приклад розрахунку оцінки надійності нерозрізних залізобетонних балок, які випробовували дію малоциклових повторних і знакозмінних навантажень.

On the basis of experimental and theoretical studies of the operation of continuous reinforced concrete beams under the action of low-cycle repeated and sign-changing loads, an analysis of their reliability was performed. In the course of experimental studies, it was found that short-cycle loads with variable signs significantly affect the change in the parameters of the stress-strain state, namely, they increase the width of the opening of cracks and deflections and reduce the load-bearing capacity. The method of limit states laid down in the current regulatory documents allows to ensure the necessary load-bearing capacity of the specified structures due to the use of various coefficients of reliability and responsibility. However, sufficient bearing capacity does not guarantee its sufficient reliability during operation, the

quantitative assessment of which remains unknown at the project development stage. Moreover, with a change in the original design factors adopted in the calculation (classes of concrete, reinforcement and reinforcement coefficient), the directions of change of these two characteristics may turn out to be different in general, since the value of reliability is random in nature. Using the experimental results of research, a numerical example of calculating the reliability of uncut reinforced concrete beams, which tested the actions of low-cycle repeated and sign-changing loads, was performed.

Ключові слова: нерозрізні балки, малоциклові знакозмінні навантаження, надійність, випадкові величини.

uncut beams, low-cycle variable-sign loads, reliability, random variables.

Вступ. Швидкий розвиток будівельного виробництва вимагає постійного вдосконалення методів розрахунку і проектування залізобетонних конструкцій, спрямованого на забезпечення їх надійності в експлуатації при одночасному зниженні матеріалоемності та інших витрат.

Питання надійності і конструктивної безпеки будівель і споруд, так як і ресурсозбереження, завжди були і залишаються проблемами.

Необхідні умови проектування, зведення і експлуатації будівель і споруд – це надійність і економічність. Необхідність забезпечення високого рівня надійності будівельних об'єктів і їх конструктивних елементів абсолютно очевидна, оскільки їх вихід із ладу, включаючи можливі аварії і руйнування, призводить до великих економічних збитків, небезпечних екологічних наслідків, а іноді до катастроф з людськими жертвами.

Досвід будівництва і експлуатації будівель і споруд різного призначення показує, що однотипні будівлі і споруди, які будуються і експлуатуються абсолютно в аналогічних умовах, або їх конструктивні елементи виходять із ладу в різні випадкові періоди. Практично неможливо точно визначити термін служби будівельної конструкції чи будівлі в цілому, а можна лише оцінити ймовірність, з якою буде експлуатуватись ця будівля протягом заданого періоду. А значить в методах оцінки розрахункової надійності конструктивних елементів необхідна достовірна інформація про змінність параметрів міцності і деформативності будівельних матеріалів, величини навантажень, їх характеру, як випадкових величин, відхилень від розрахункових моделей і т.п. Із всіх факторів, що впливають на надійність будівель і споруд і їх конструктивних елементів, навантаження і його дії являють собою найбільш невизначені величини, що мають великі статистичні розкиди. Тому вивчення мінливості режимів навантажень відіграє головну роль в питаннях надійності і конструктивної безпеки будівельних конструкцій, будівель і споруд.

Аналіз останніх публікацій. Розвиток і становлення базових основ забезпечення надійності в будівництві було започатковано ще в кінці 20-х

років минулого століття в наукових працях М. Майера [1] та М.Ф. Хаціалова [2]. Пізніше в 40-50-ті роки минулого століття ряд зарубіжних і вітчизняних учених приділили увагу проблемі безпечності будівельних конструкцій, у яких як випадкові величини використовувались не тільки міцнісні характеристики матеріалів, а й параметри навантажень. Сучасне загальноприйняте трактування поняття надійності в сфері будівельної галузі пов'язується, в першу чергу, з роботами М.С. Стрелецького [3] і А.Р. Ржаніцина [4]. Автори цих робіт заклали «фундамент» сучасної теорії надійності будівель і споруд, де в якості випадкових величин використовувались статистична природа мінливості міцнісних параметрів матеріалів і параметрів навантажень. На цьому доведено необхідність ймовірнісної оцінки роботоздатності будівлі. А.Р. Ржаніцин сформував принципові положення концепції безпеки будівельних об'єктів, що представляють собою базові засади усієї теорії надійності.

Дещо пізніше фундаментальні дослідження, присвячені проблемі надійності з використанням ймовірнісних моделей проводили такі вчені як В.В. Болотін [5], В.Д. Райзер [6, 7]. Значний вклад у вдосконалення методів розрахунку надійності конструкцій внесли В.А. Перельмутер [8, 9], А.П. Кудзіс [10], А.С. Лигов [11], М.М. Застава [12], С.Ф. Пічугін [13, 14], А.І. Лантух-Лященко [15] і інші.

Із закордонних досліджень даної проблеми відомі роботи А.І. Vonson [16], А.М. Frendenthal [17], Г. Агусті, А. Братта, Ф. Кашнати [18], О. Ditlevsen and Н.О. Madsen [19], R. Melchers and M. Ahammed [20] і інші.

Мета і задачі досліджень. На основі експериментально-теоретичних досліджень визначити розрахункову надійність нерозрізних залізобетонних балок за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень.

Нерозрізні залізобетонні елементи є достатньо поширеними в складі будівель та споруд. При цьому навантаження які діють на такі елементи, мають різноманітний характер – від дії одноразових статичних до малоциклових повторних і знакозмінних. Останні навантаження спричиняють особливі умови роботи вище вказаних елементів, викликаючи зміни міцнісних і деформативних характеристик бетону, впливаючи на процеси тріщиностійкості і деформативності, а також на зміну несучої здатності. Діючі нормативні документи [21, 22] у розрахунках залізобетонних елементів не враховують характер передісторії їх завантажень.

Малоциклові знакозмінні навантаження в нерозрізних балках можуть виникати при реконструкції будівель і споруд, коли змінюється їх конструктивна схема, а також при аварійних ситуаціях.

В лабораторії кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд були проведені експериментальні дослідження роботи нерозрізних балок за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень різних режимів і інтенсивності. Нерозрізні балки розмірами

перерізу 100x160мм, прольотом 150мм. Виготовлялись балки із бетону С25/30 і армовані двома зварними каркасами в прольотах і на опорі. Армування балок подвійне – симетричною робоча арматура поздовжня із класу А400С по два стержні діаметром 12мм. В якості поперечної арматури прийняті стержні діаметром 6мм із класу А240. Випробування балок виконувалось в спеціальній установці з використанням гідравлічного преса. Детально описані конструкції зразків і методика проведення експериментальних випробувань в роботі [23].

Аналіз експериментальних досліджень показав, що малоциклові знакозмінні навантаження знижують несучу здатність на 16%...18%, а прогини, деформації арматури і бетону та ширину розкриття тріщин на 20%...40% в порівнянні з однозначним статичним навантаженням. Тому при розрахунку нерозрізних балок за першою і другою групами граничних станів рекомендуються враховувати у відповідних розрахункових формулах [21] шляхом множення міцнісних і деформативних характеристик бетону на коефіцієнти умов роботи бетонів за міцністю і деформаціях γ_i , визначених теоретичним шляхом і наведених в роботі [23].

В результаті вище викладеного визначимо оцінку розрахункової надійності нерозрізних залізобетонних балок, що зазнають дії малоциклових знакозмінних навантажень на основі числового прикладу.

Числовий приклад. Вихідні дані – нерозрізна двох пролітна балка з розмірами $b \times h = 100 \times 160$ мм, $a = a' = 15$ мм, армування подвійне арматурою $\varnothing 12$ мм із класу А400С ($A_s = A_s' = 2.26 \text{ см}^2$), $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$, бетон класу С25/30 ($f_{cd} = 17 \text{ МПа}$). Максимальний розрахунковий момент $M_u = 12.2 \text{ кНм}$, при руйнуванні балки (прийняті параметри із даних випробувань).

Оцінюємо розрахункову надійність за методикою, викладеною в [14] з дотриманням вимог [24].

Статистичні характеристики матеріалів

Бетон С25/30

- математичне співвідношення

$$\overline{\sigma_c} = \frac{f_{cd}}{1 - 1.64V} = \frac{17}{1 - 1.64 \cdot 0.135} = 21.83 \text{ МПа} = 2,18 \text{ кН / см}^2,$$

де $V_c = 0.135$ - коефіцієнт варіації,

- Стандарт

$$\hat{\sigma}_c = \overline{\sigma_c} \cdot V_c = 21.83 \cdot 0.135 = 2.95 \text{ МПа} = 0,295 \text{ кН / см}^2.$$

Арматура А400С

- математичне сподівання

$$\overline{\sigma_s} = f_{yd} = 365 \text{ МПа} = 36,5 \text{ кН / см}^2$$

$$\overline{\sigma_{sc}} = f'_{yd} = 300 \cdot 0.0436 = 13.08 \text{ МПа} = 1,31 \text{ кН / см}^2,$$

де f'_{yd} - взято з експерименту.

Коефіцієнт варіації для арматури $V_s = 0.0436$ табл. 2.31 [14].

- стандарт

$$\hat{\sigma_s} = \overline{\sigma_s} \cdot V_s = 365 \cdot 0.0436 = 15.91 \text{ МПа} = 1,59 \text{ кН / см}^2.$$

$$\hat{\sigma_{sc}} = \overline{\sigma_{sc}} \cdot V_s = 300 \cdot 0.0436 = 13.08 \text{ МПа} = 1,31 \text{ кН / см}^2.$$

Числові характеристики граничного моменту

- математичне сподівання граничного моменту

$$\begin{aligned} \overline{M_{ult}} &= \overline{\sigma_s} \cdot A_s \cdot d - \overline{\sigma_{sc}} \cdot A'_s \cdot a' - 0.5 \left(\frac{\overline{\sigma_s} A_s - \overline{\sigma_{sc}} A'_s}{\overline{\sigma_c} \cdot b} \right)^2 = 36.5 \cdot 2.26 \cdot 14.5 - 30.0 \cdot 2.26 \cdot 1.5 - \\ &- \frac{0.5}{21.83} (36.5 \cdot 2.26 - 30 \cdot 2.26)^2 = 1693.1 \text{ кНсм} = 16,93 \text{ кНм}. \end{aligned}$$

Для обчислення стандарту граничного моменту визначимо коефіцієнти D_s, D_{sc} і D_c

$$D_s = \frac{A_s}{\overline{\sigma_c} \cdot b} [\overline{\sigma_c} db - (\overline{\sigma_s} A_s - \overline{\sigma_{sc}} A'_s)] = \frac{2.26}{2.18 \cdot 10} [2.18 \cdot 14.5 \cdot 10 - (1.59 \cdot 2.26 - 1.31 \cdot 2.26)] = 32.7 \text{ см}^3$$

$$D_{sc} = \frac{A'_s}{\overline{\sigma_c} \cdot b} [-\overline{\sigma_c} ba' + (\overline{\sigma_s} A_s - \overline{\sigma_{sc}} A'_s)] = \frac{2.26}{2.18 \cdot 10} [2.18 \cdot 10 \cdot 1.5 - (1.59 \cdot 2.26 - 1.31 \cdot 2.26)] = -3.32 \text{ см}^3$$

$$D_c = \frac{0.5}{\overline{\sigma_c} \cdot b} [(\overline{\sigma_s} A_s - \overline{\sigma_{sc}} A'_s)] = \frac{0.5}{2.18^2 \cdot 10} [(1.59 \cdot 2.26 - 1.31 \cdot 2.26)] = 0.0042 \text{ см}^3$$

Визначаємо стандарт граничного моменту

$$\begin{aligned} \hat{M}_{ult} &= \sqrt{\left(D_c \hat{\sigma_c} \right)^2 + \left(D_s \hat{\sigma_s} \right)^2 + \left(D_{sc} \hat{\sigma_{sc}} \right)^2} = \\ &= \sqrt{(0.0042 \cdot 0.295)^2 + (32.7 \cdot 1.59)^2 + (-3.32 \cdot 1.31)^2} = \\ &= 52.175 \text{ кНсм} = 0,52 \text{ кНм}. \end{aligned}$$

Імовірність відмови балки. Обчислюємо характеристику безпеки по відношенню до вихідного розрахункового значення зовнішнього згинального моменту в балці

$$\beta = \frac{\overline{M_{ult}} - M_u}{\hat{M}_{ult}} = \frac{16.93 - 12.2}{0.52} = 9.09$$

Імовірність відмови балки визначаємо за таблицею Д.3 [14]

$$Q(\beta) = 1.13 \cdot 10^{-19}$$

Як бачимо із отриманих результатів надійність випробуваних балок за дії знакозмінних навантажень досить висока.

Висновки. За результатами аналізу експериментально-теоретичних досліджень роботи нерозрізних залізобетонних балок, що працюють за дії малоциклових знакозмінних навантажень визначено розрахункову надійність їх. Слід зазначити, що надійність роботи даних конструкцій в процесі експлуатації буде збережена.

1. Mayr M. Die Sicherheit der Bauwerte und ihre Berechnung nach Graften statt nach zulässigen Spannugen/ Spriger Verlag, Berlin, 1926/

2. Хоциалов Н.Ф. Запаси прочности. Строительная промышленность, №10. – М.:1926.

Khotsyalov N.F. Zapasy prochnosty. Stroytelnaia promyshlennost, №10. –М.:1926.

3. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. – М.: Стройиздат, :1947, - 94с.

Streletskyi N.S. Osnovy statystycheskoho ucheta koэфfitysyenta zapasa prochnosty sooruzheniy. – М.: Stroiyzdat, :1947, - 94s.

4. Ржанцын А.Р.. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.:Стройиздат, 1978. -238с.

Rzhantsyn A.R.. Teoryia rascheta stroytelnykh konstruktsyi na nadezhnost. – М.:Stroiyzdat, 1978. -238s.

5. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982. 352с.

Bolotyn V.V. Metody teoryy veroiatnostei y teoryy nadezhnosty v raschetakh sooruzheniy. М.: Stroiyzdat, 1982. 352s.

6. Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1995. -348с.

Raizer V.D. Raschet y normyrovanye nadezhnosty stroytelnykh konstruktsyi. – М.: Stroiyzdat, 1995. -348s.

7. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений /В.Д. Райзер. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 384с.

Raizer V.D. Teoryia nadezhnomy sooruzheniy /V.D. Raizer. – M.: Yzd-vo ASV, 2010. – 384s.

8. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ. 2007. – 256с.

Perelmutter A.V. Yzbrannyye problemy nadezhnomy y bezopasnomy stroytelnykh konstruktsiyi. 3-ye yzd. pererab. y dop. – M.: Yzd-vo ASV. 2007. – 256s.

9. Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. – Новые направления в анализе надежности строительных конструкций: Сб. статей – Саарбрюккен, Германия: Изд-во LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 112с.

Perelmutter A.V., Pichuhyn S.F. – Novyye napravleniya v analyze nadezhnomy stroytelnykh konstruktsiyi: Sb. statei – Saarbriukken, Hermanyia: Yzd-vo LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 112s.

10. Кудзис А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций – Вильнюс: Москлас, 1985-156с.

Kudzys A.P. Otsenka nadezhnomy zhelezobetonnykh konstruktsii – Vylnius: Mosklas, 1985-156s.

11. Личков А.С. Надежность строительных конструкций. – М.:АСВ, 2008. – 184с.

Lychkov A.S. Nadezhnost stroytelnykh konstruktsiyi. – M.:ASV, 2008. – 184s.

12. Застава М.М. Агаев А.А., Работин Ю.А. Регулирование расчетной надежности железобетонных конструкций. Одесса, 1996. – 94с.

Zastava M.M. Ahaev A.A., Rabotyn Yu.A. Rehulyrovanye raschetnoi nadezhnomy zhelezobetonnykh konstruktsiyi. Odessa, 1996. – 94s.

13. Пичугин С.Ф. Надійність технічних систем. Навч. Посібник – Полтава: ПолтДТУ, 2000. – 157с.

Pichuhin S.F. Nadiinist tekhnichnykh system. Navch. Posibnyk – Poltava: PoltDTU, 2000. – 157s.

14. Пичугин С.Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій: монографія /С.Ф. Пичугін. – Полтава: ТОВ «АСМГ», 2016. – 520с.

Pichuhin S.F. Rozrakhunok nadiinosti budivelnykh konstruktsii: monohrafiia /S.F. Pichuhin. – Poltava: TOV «ASMH», 2016. – 520s.

15. Лантух-Лященко А.И. Концепция надежности в Еврокоде / Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, №6. – Київ, 2014. – с.79-88

Lantukh-Liashchenko A.I. Kontseptsyia nadezhnomy v Evrokode / Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, №6. – Kyiv, 2014. – s.79-88

16. Jonson A.I. Streng/ Safetly und economical dimensions of structures/ Bull of Div.Struct/Engng, Roy.Inst.Tech. Stockholm, - 1953, - №12. -373-78.

17. Fureudenthal A.M. The Safety and the Probability of Structural Failure. – Proc.of ASCE , vol. 80, paper №468, 1954. – p.451-469.

18. Аугусти Г., Баратта А., Кашиатти Ф. Вероятные методы в строительном проектировании. (Пер. с англ.) М.:Стройиздат, 1988. -580с.

Auhusty H., Baratta A., Kashyatty F. Veroiatnyye metody v stroytelnom proektyrovanyu. (Per. s anhl.) M.:Stroiizdat, 1988. -580s.

19. Ditlwsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods. – Texnikal University of Denmark, 2007. -361p.

20. Melchers R.E., Ahammed M.A. Fast approximate method for parameter sensitivity estimation in Monte Carlo structural reability / COMPUTERS & STRUCTURES. – Kidington, 2004, - p.55-61.

21. ДБН В.2.6-2009. Конструкції будинків і споруд, бетонні і залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. - 97с.

DBN V.2.6-2009. Konstruktsii budynkiv i sporud, betonni i zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia proektuvannia. – К.: Minrehionbud Ukrainy, 2009. -97s

22. ДСТУ Б.В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні і залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. –К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 188с.

DSTU B.V.2.6-156:2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni i zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyly proektuvannia. –К. : Minrehionbud Ukrainy, 2010. – 188s.

23. Ющук О.В. Несуча здатність, тріщиностійкість і деформативність нерозрізних залізобетонних балок за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень: дис.. к.т.н. – Рівне, 2021, - 160с.

Iushchuk O.V. Nesucha zdatnist, trishchynostiikist i deformatyvnyist nerozriznykh zalizobetonnykh balok za dii malotsyklovykh povtornykh i znakozminnykh navantazhen: dys.. k.t.n. – Rivne, 2021, - 160s.

24. ДБН В.1.2-14-2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінрегіонбуд, 2018. -30с.

DBN V.1.2-14-2018. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktsii ta osnov. – К.: Minrehionbud, 2018. - 30s.