

МЕХАНІЗМ РІВНЕВОГО УТВОРЕННЯ ТА РОЗКРИТТЯ НОРМАЛЬНИХ ТРІЩИН В ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ

MECHANISM OF NORMAL CRACKS LEVEL FORMATION AND OPENING IN BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Ромашко-Майструк О.В., к.т.н., ORCID: 0000 - 0003- 3353 - 2268, Ромашко В.М., д.т.н., доц., ORCID: 0000-0003-3448-7489 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Romashko-Maistruk O.V., PhD (Tech.), Romashko V.M., D. Sc. (Tech.), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Обґрунтовано доцільність розрахунку ширини розкриття нормальних тріщин через послідовне накопичення взаємних зміщень бетону і арматури. Підтверджено пріоритетну роль нелінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном в практичних розрахунках тріщиностійкості згинальних елементів.

This article is devoted to experimental and theoretical studies of the main regularities and features of the normal cracks sequential formation and opening process in bending reinforced concrete elements. Experiments have confirmed that the real process of normal cracks formation in bending elements is multilevel. The most important characteristics of the test beams are given. According to their tests results, it was established that when calculating the normal cracks opening width in bending reinforced concrete elements, it is possible to limit the first two levels of their formation. For each of all the detected crack formation levels, the corresponding values of not only the loads, but also the internal forces, the step and the normal cracks opening width have been established. A general and simplified method of calculating multi-level formation and opening of normal cracks in bending reinforced concrete elements is proposed. According to the research results, the feasibility of calculating the normal cracks opening width by successive accumulation of mutually displaced concrete and reinforcement is substantiated. The priority role of the non-linear function of the average stress adhesion of reinforcement with concrete in practical calculations of the bending elements crack resistance is confirmed. The developed calculation methods of normal cracks multi-level formation and opening in bending elements are also evaluated due to their comparison with existing methods.

The effectiveness of those calculation methods in which the rate of normal cracks formation is directly related to the forces (stress) of the reinforcement to the concrete adhesion is statistically confirmed.

Ключові слова:

Залізобетон, згинальні елементи, нормальні тріщини, рівні утворення, крок, ширина розкриття

Reinforced concrete, bending elements, normal cracks, levels of crack formation, step, opening width

Вступ. Загальновідомо, що процеси утворення та розвитку тріщин в залізобетонних елементах і конструкціях безпосередньо впливають на збереження їх експлуатаційних властивостей. З цієї причини питання тріщиностійкості залізобетонних елементів завжди були та залишатимуться й надалі одними із основних в теорії залізобетону. Крім того, нинішня практика проектування згинальних залізобетонних елементів ґрунтується на застосуванні деформаційних моделей їх опору силовим впливам. А це, в свою чергу, вимагає більш точного відтворення реального напружено-деформованого стану вказаних елементів в процесі їх деформування [1].

Водночас слід усвідомлювати, що утворення та розвиток тріщин в залізобетонних елементах є прямим наслідком порушення зчеплення арматури з розтягнутим бетоном. Однак розробка самої методики розрахунку утворення та розкриття нормальних тріщин з урахуванням зчеплення арматури з бетоном і досі продовжує стикатися зі значними труднощами. Зокрема, методики, що базуються на використанні відомої гіпотези Томаса [2], у більшості випадків є декларативними через проблему прямого інтегрування виразу взаємних зміщень бетону і арматури. Основна причина цієї проблеми полягає в тому, що дійсна залежність зчеплення арматури з бетоном є надзвичайно складною та не може бути описана одною універсальною функцією.

Тому, зважаючи на вищесказане, методику практичного розрахунку залізобетонних елементів за тріщиностійкістю нормальних перерізів з урахуванням зчеплення арматури з бетоном, все ж таки, доцільно було б спростити. Задля цього крок утворення тріщин, а значить і ширину їх розкриття, необхідно пов'язати безпосередньо з зусиллями взаємодії арматури з бетоном на ділянці їх активного зчеплення. До того ж, слід врахувати, що сам процес утворення тріщин є багаторівневим. Цілком очевидно, що питання можливості застосування подібного підходу до розрахунку основних параметрів тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій вимагають проведення спеціальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Загалом реальні процеси тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій досліджувались багатьма вітчизняними та зарубіжними вченими. Однак поза увагою більшості з них

залишилося те, що процеси утворення нормальних тріщин у дійсності є багаторівневими та безпосередньо пов'язані з локальними порушеннями зчеплення арматури з бетоном. Роботи ж, в яких ці питання знайшли часткове відображення, можна умовно розділити на 4-и групи.

В роботах першої групи вплив зчеплення арматури з бетоном на процес утворення та розкриття нормальних тріщин намагалися враховувати за допомогою прямого інтегрування діаграм взаємного зміщення бетону і арматури [3-6]. Однак, в практичних розрахунках відобразити взаємодію арматури з бетоном у такий спосіб вкрай складно, а ще частіше неможливо, оскільки форма вказаних діаграм при деформуванні залізобетонних елементів постійно змінюється [7-9].

До другої групи слід віднести роботи, в яких послідовність утворення і розкриття нормальних тріщин відтворюється числовими способами в рамках методу скінчених елементів за допомогою спеціальних програмних комплексів [10, 11]. Застосування такого підходу доволі часто призводить до певної втрати не тільки інженерної осяжності, але й фізичної сутності процесів зчеплення арматури з бетоном при моделюванні утворення тріщин в залізобетонному елементі.

В третю групу слід віднести дослідження, в яких процес утворення та розвитку нормальних тріщин моделюється за допомогою спеціального «двоконсольного» елемента [12]. Однак його застосування в методиках розрахунку залізобетонних елементів і досі залишається проблемним навіть при залученні спеціальних комп'ютерних програм. Обумовлено це в основному значними складнощами «виділення» та формування відповідного «двоконсольного» елемента.

В роботах четвертої групи багаторівневе утворення нормальних тріщин відтворюють за допомогою середніх напружень зчеплення арматури з бетоном [1, 13-19]. Безперечно, що цей спосіб є одним із найпростіших для реалізації в практичних розрахунках, але він не знімає питань щодо форми зв'язку між зазначеними напруженнями зчеплення арматури з бетоном та середніми напруженнями в самій арматурі. І мова йде не тільки про граничну, але і про проміжні стадії деформування залізобетонних елементів.

Постановка мети і задачі досліджень. Дані дослідження спрямовані не тільки на формування, але й експериментально-теоретичне обґрунтування моделі багаторівневого утворення та розкриття нормальних тріщин в згинальних залізобетонних елементах. Задля реалізації означеної мети було вирішено поставити наступні завдання:

- через випробування відповідних балкових зразків експериментальним шляхом дослідити загальні закономірності багаторівневого утворення та розкриття нормальних тріщин в згинальних елементах;
- розрахувати за різними методиками, включно з нормативною, теоретичну ширину розкриття нормальних тріщин в згинальних елементах за багаторівневою схемою їх утворенні;

- здійснити відповідні статистичні порівняння отриманих результатів вищевказаних розрахунків з дослідними даними та оцінити ефективність різних способів урахування зчеплення арматури з бетоном у розрахунках тріщиностійкості згинальних залізобетонних елементів.

Методика досліджень. В основу даних досліджень покладаються експериментальне вивчення та математичне моделювання реального процесу багаторівневого утворення і розкриття нормальних тріщин в згинальних елементах, а також статистична оцінка ефективності різних методів розрахунку основних параметрів тріщиностійкості зазначених елементів.

Результати досліджень. Оскільки розрахунок ширини розкриття тріщин шляхом безпосереднього інтегрування виразу взаємних зміщень бетону і арматури зазвичай є доволі складним, то у більшості випадків його замінюють числовим. Водночас загальновідомо, що зазначене інтегрування можна замінити і послідовним накопиченням взаємних зміщень бетону та арматури. Тому дані експериментально-теоретичні дослідження спрямовані на вивчення реального механізму саме ступеневого накопичення вказаних зміщень. Можливість застосування такого прийому до розрахунку утворення та розкриття нормальних тріщин було вирішено перевірити на згинальних залізобетонних елементах. Для цього було виготовлено та випробувано три балкових зразки (рис. 1) з важкого бетону класу C20/25.

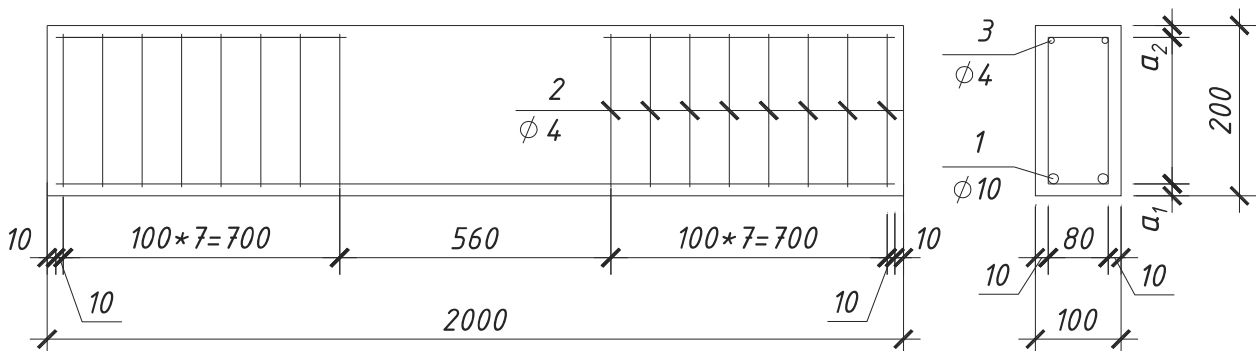


Рис.1. Конструкція та схема армування балкових зразків

У нижній розтягнутій зоні всіх залізобетонних балок розміщувалося по два поздовжніх стержні діаметром 10 мм з арматури класу А500С. Поперечні стержні приймалися у вигляді гнутих замкнутих хомутиків діаметром 4 мм з арматури класу Вр-І. Їх встановлювали лише на припорних ділянках (поза зоною чистого згину) з кроком 100 мм. Такою була і конструктивна арматура у верхній стиснутій зоні балок на зазначених ділянках (рис. 1).

Отримані при випробуваннях результати експериментальних досліджень підтвердили, що процес утворення нормальних тріщин в залізобетонних балках у дійсності є багаторівневим [18].

Через значну неоднорідності напружено-деформованого стану балок перші тріщини в них почали з'являтися вже після 3-го ступеня навантаження за внутрішніх зусиль $M_{w,1} \approx (0,125 \dots 0,17) M_u$. А оскільки ширина розкриття

тріщин була співрозмірною з ціною поділки мікроскопа, то виявити їх було вкрай складно навіть за допомогою останнього. Загалом же ширина розкриття нормальних тріщин сягала всього 0,02...0,05 мм, а їх крок коливався в межах 80...205 мм.

Якщо говорити про тріщин другого рівня, то вони почали утворюватися і ставати видимими переважно на 6...7 ступенях навантаження за внутрішніх зусиль $M_{w,2} \approx (0,33...0,5)M_u$. Крок між ними зменшувався до 60...105 мм. Ширина розкриття зазначених тріщин на вказаний момент зростала до 0,09...0,13 мм. Також було помічено, що з появою тріщин другого рівня інтенсивність розкриття основних (магістральних) тріщин на певний час дещо «пригальмовувалася».

Щодо тріщин третього рівня, то крок між ними вже зменшувався аж до 30...70 мм. Вони з'являлися на 8...12 ступенях навантаження за внутрішніх зусиль, що були в межах $M_{w,3} \approx (0,78...0,95)M_u$. При цьому, ширина розкриття найбільш небезпечних (магістральних) тріщин сягала 0,17...0,22 мм. В момент вичерпання несучої здатності, переважно внаслідок текучості арматури, максимальна ширина розкриття нормальних тріщин зростала аж до 0,7...1,8 мм.

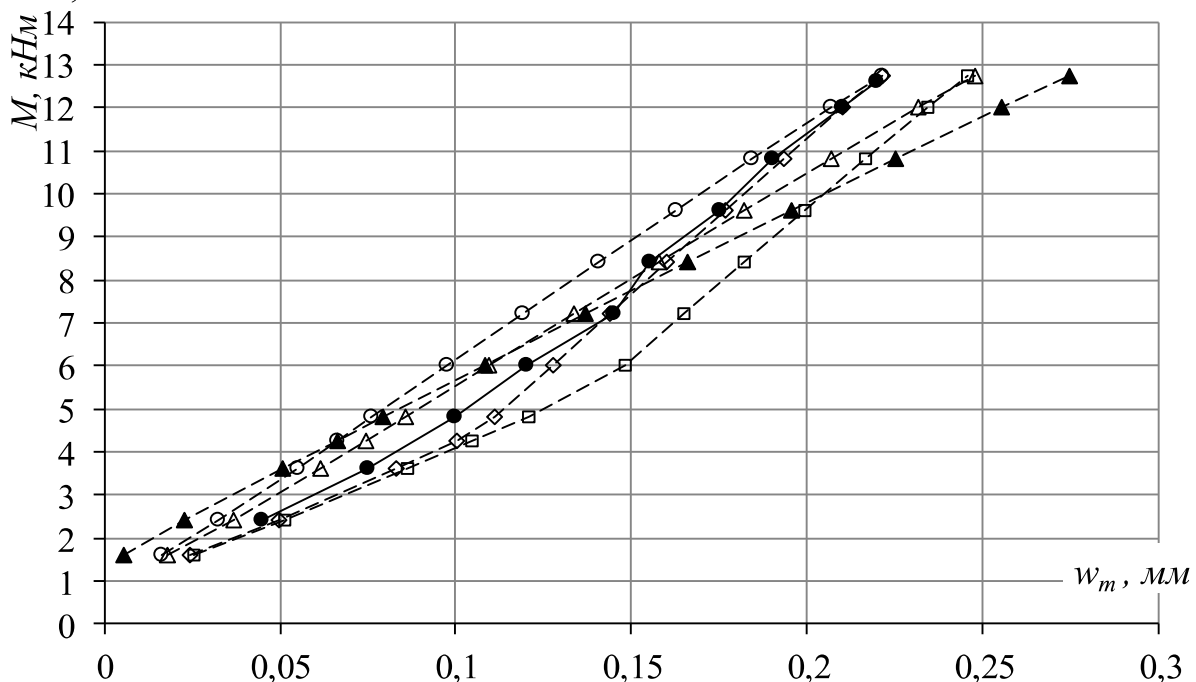


Рис. 2. Графіки розкриття тріщин в балці Б-1: ● – експериментальні; теоретичні за методиками Δ – норм [20; 21], ▲ – СП [22], □ – ДСМ [1] з лінійними τ_{bm} [12], ◇ – загальною [18], ○ – спрощеною [1, 18]

Експериментальні значення ширини розкриття нормальних тріщин в досліджуваних балках на всіх етапах їх завантаження порівнювалися з теоретичними значеннями, обчисленими за різними методиками (рис. 2 і 3, табл. 1). Розрахунки виконувались за загальною [18] та спрощеною [1, 18] методиками авторів, за методиками чинних норм різних країн [20-22] та за

деформаційно-силовою моделлю [1] з використанням лінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном τ_{bm} [12].

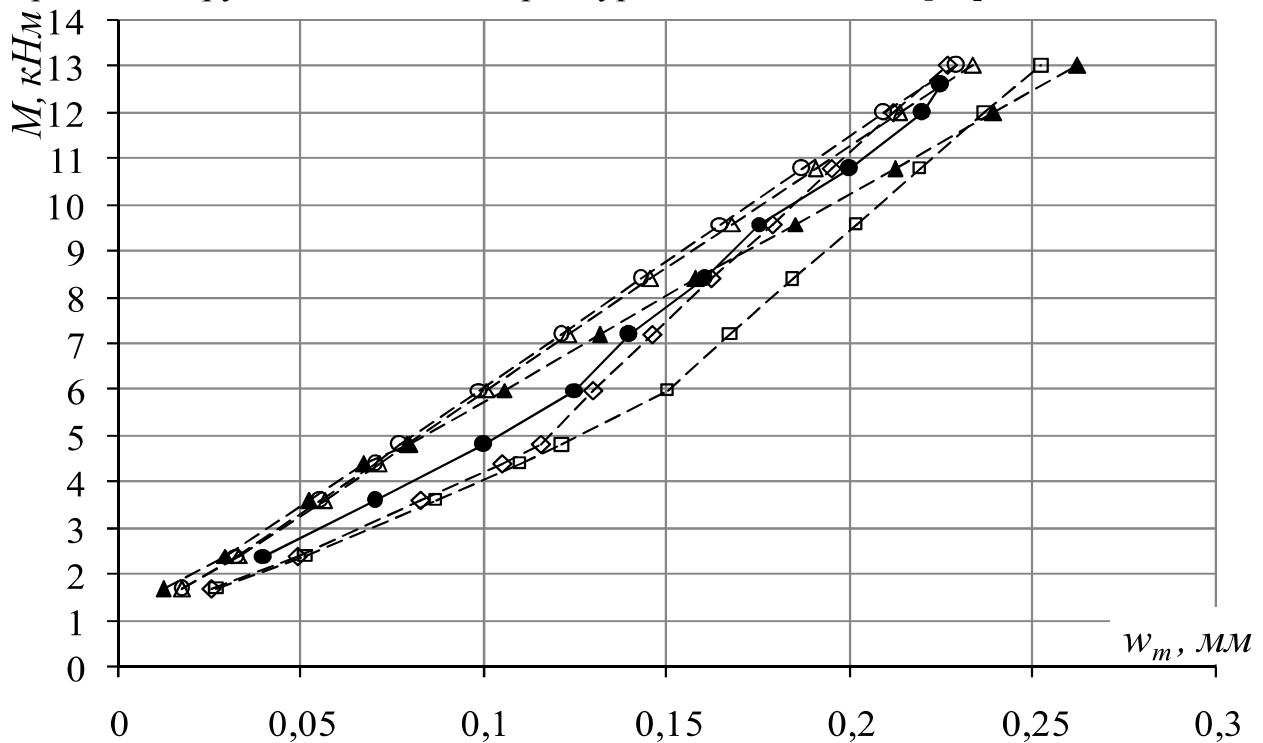


Рис. 3. Графіки розкриття тріщин в балці Б-2: ● – експериментальні; теоретичні за методиками – норм [20; 21], – СП [22], – ДСМ [1] з лінійними τ_{bm} [12], – загальною [18], – спрощеною [1, 18]

Таблиця 1

Статистичні порівняння теоретичної та експериментальної ширини розкриття нормальних тріщин в згинальних залізобетонних елементах

Методика розрахунку	Відхилення від дослідних даних		Коефіцієнт варіації v , %
	середньо арифметичне Δ , %	середньо квадратичне σ , %	
норм [20; 21]	7,26	10,74	11,58
СП [22]	3,0	23,14	23,87
ДСМ [1] та лінійних τ_{bm} [12]	16,04	5,17	4,46
загальна [18]	5,0	6,6	6,29
спрощена [1, 18]	12,93	9,57	10,99

Висновки. Отримані результатам проведених досліджень дозволили:

- визначити основні закономірності та особливості механізму утворення і розкриття нормальних тріщин в згинальних залізобетонних елементах;
- переконатися, що реальний процес утворення нормальних тріщин в згинальних елементах є багаторівневим;

- встановити, що при розрахунку ширини розкриття нормальних тріщин в згинальних елементах можна обмежуватися 2-ма рівнями їх утворення;
- обґрунтувати пріоритетну роль нелінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном в практичних розрахунках тріщиностійкості згинальних елементів;
- підтвердити доцільність розрахунку ширини розкриття нормальних тріщин через послідовне накопичення взаємних зміщень бетону і арматури;
- оцінити розроблені методи розрахунку утворення та розкриття нормальних тріщин в згинальних елементах через їх порівняння з уже існуючими.

1. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Львів, 2018. 533 с.

Romashko V. M. Deformatsiino-sylova model oporu betonu i zalizobetonu: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.01. Lviv, 2018. 533 s.

2. Thomas F. G. Cracking in Reinforced Concrete. *The Structural Engineer*. July 1936. Vol. 14, No. 7. P. 298-320.

3. Alvarez M. Einfluss des Verbundverhaltens auf das Verformungsvermögen von Stahlbeton: Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der Technischen Wissenschaften. Zürich: Eidgenössischen Technischen Hochschule, 1998. 189 p.

4. Ruiz M. R., Hars E., Muttoni A. Bond mechanics in structural concrete. Theoretical model and experimental results. Lausanne: IS-BETON, EPFL, 2005. 75 p.

5. Майоров В. И., Кузьмин П. К. От условной к точной модели расчета трещиностойкости железобетонных сечений. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2011. № 2. С. 22-28.

Mayorov V. I., Kuzmin P. K. Ot uslovnoy k tochnoy modeli rascheta treschinostoykosti zhelezobetonnyih secheniy. *Stroitel'naya mehanika inzhenernyih konstruksiy i sooruzheniy*. 2011. No. 2. S. 22-28.

6. Рудный И. А. Трещиностойкость растянутых и изгибаемых железобетонных элементов с участками нарушенного сцепления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Санкт-Петербург, 2015. 22 с.

Rudny I. A. Treschinostoykost rastyanutyih i izgibaemyih jelezobetonnyih elementov s uchastkami narushennogo stsepleniya: avtoref. dys. ... cand. tekhn. nauk: 05.23.01. St-Petersburg, 2015. 22 s.

7. Eligehausen R., Popov E. P. and Bertero V. V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: Report No. UCB/EERC-83/23. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center of California University, 1983. 169 p.

8. Shima H., Chou L.-L. and Okamura H. Micro and macro models for bond in reinforced concrete. *Journal of the Engineering Faculty of Tokyo University*. 1987. Vol. XXXIX, No. 2. P. 133-194.

9. Harajli M. H., Hout M. A. and Jalkh W. Local bond stress-slip behavior of reinforced bars embedded in plain and fiber concrete. *ACI Materials Journal*. 1995. Vol. 92, No. 4. P. 343-353.

10. Веселов А. А. Нелинейная теория сцепления арматуры с бетоном и ее приложения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Санкт-Петербург, 2000. 44 с.

Veselov A. A. Nelinejnaya teoriya sctsepleniya armatury` s betonom i ee prilozheniya: dis. d-ra tekhn. nauk: 05.23.01. Sankt-Peterburg, 2000. 44 s.

11. Shardakov I. N., Bykov A. A., Shestakov A. P., Glot I. O. Process of cracking in reinforced concrete beams: simulation and experiment. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 38. P. 339-350.

12. Яковенко І. А. Моделі деформування залізобетону на засадах механіки руйнування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 44 с.

Yakovenko I. A. Modeli deformuvannia zalizobetonu na zasadakh mekhaniky ruinuvannia: avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk: 05.23.01. Poltava, 2018. 44 s.

13. Кочкаръов Д. В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 43 с.

Kochkarov D. V. Neliniinyi opir zalizobetonnykh elementiv i konstruktsii sylovym vplyvam: avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk: 05.23.01. Poltava, 2018. 43 s.

14. Romashko O., Romashko V. Evaluation of bond between reinforcement and concrete. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 230. 02027.

15. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 181. С. 58-65.

Romashko V. M., Romashko O. V. Rozrakhunok trishchynostiikosti zalizobetonnykh elementiv z urakhuvanniam rivniv utvorennia normalnykh trishchyn. *Zb. nauk. prats UDUZT*. 2018. Vyp. 181. S. 58-65.

16. Romashko O. V. and Romashko V. M. Model of multilevel formation of normal cracks in reinforced concrete elements and structures. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. 012069.

17. Romashko V., Romashko O. Calculation of the crack resistance of reinforced concrete elements with allowance for the levels of normal crack formation. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 230. 02028.

18. Ромашко-Майструк О. В. Опір залізобетонних елементів багаторівневному утворенню нормальних тріщин: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Рівне, 2021. 217 с.

Romashko-Maistruk O. V. Opir zalizobetonnykh elementiv bahatorivnevomu utvorenniu normalnykh trishchyn: dys. ... cand. tekhn. nauk: 05.23.01. Rivne, 2021. 217 s.

19. Ромашко-Майструк О. В., Ромашко В. М. Тріщиностійкість залізобетону з позицій локального порушення зчеплення арматури з бетоном: монографія. Рівне: Волинські обереги, 2022. 184 с.

Romashko-Maistruk O. V., Romashko V. M. Trishchynostiikist zalizobetonu z pozytsii lokalnoho porushennia zchepлення armatury z betonom: monohrafiia. Rivne: Volynski oberehy, 2022. 184 s.

20. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.

DSTU B V.2.6-156: 2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyly proektuvannia. [Chynnyi vid 01.06.11]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 123 s

21. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p.

22. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. [Введен 01.01.2013]. Москва: Минрегион России, 2013. 155 с.

SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii. Osnovnyye polozheniya. [Vveden 01.01.2013]. Moskva: Minregion Rossii. 2013. 155 s.