

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОРОЗІЇ АРМАТУРИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

RESEARCH OF INFLUENCE OF CORROSION OF REINFORCEMENT ON REINFORCED CONCRETE ELEMENTS` STRESS-STRAIN STATE

Бліхарський Я.З., к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-3374 -9195, **Копійка Н.С.**, бакалавр, ORCID 0000 - 0003 - 2270 - 4028, **Солодкий С.Й.**, д.т.н., проф., ORCID0000-0001-9829-5123 (Національний університет «Львівська політехніка», м.Львів), **Іваницька Л.М.**, викладач (ВСП"Техніко-економічний фаховий коледж Національного університету "Львівська політехніка")

Blikharsky Ya. Z., PhD, assoc. prof., ORCID 0000-0002-3374 -9195, **Kopiika N.S.**, undergraduate student, ORCID 0000-0003-2270-4028, **Solodky S.**, DSc, prof. (Lviv Polytechnic National University), **Ivanytska L.M.**, lecturer (SSU "Technical and Economic Vocational College of National University "Lviv Polytechnic")

Напружено-деформований стан залізобетонного елемента залежить від багатьох зовнішніх силових і несилових факторів, серед яких одним із найбільш поширених є корозійні пошкодження. В роботі проведено детальний огляд досліджень впливу корозійних дефектів на напружено-деформований стан залізобетонних елементів, аналіз і систематизацію результатів наукових робіт. Зроблено висновки, що корозійні дефекти в арматурі ускладнюють напружено-деформований стан, знижують несучу здатність конструкції. Також окреслено перспективні напрямки подальших експериментальних і теоретичних досліджень.

Abstract. Characteristic features of the building industry are significant capital investments required for new construction and dependence on external factors, which includes scientific, technological and economic parameters. Therefore, general trend in construction production is towards the maximum use of existing construction funds, their optimization, reconstruction, strengthening. Reinforced concrete is commonly used for structures for various purposes; therefore, technical and economic aspects of its physical and mechanical parameters` restoration are of great importance. The reinforced concrete element stress-strain state depends on many external factors, including the following: the load type, atmospheric conditions, various defects, damages, geometric deviations. Obviously, one of the most common damages` reasons is rebar corrosion in reinforced concrete elements, which significantly affects both the strength and deformation parameters of the material, as well as the internal stresses` parameters. The main purpose of the

work is to conduct the detailed review of available experimental and theoretical studies of the corrosion defects' influence on the reinforced concrete elements' stress-strain state, to provide thorough analysis and systematization of the existing scientific works' results. The conclusion was made, that the reinforcement corrosion significantly complicates the reinforced concrete elements' stress-strain state, reduces the bearing capacity of the whole structure. In the work the attention is paid to material chemical and mechanical peculiarities and kinetics of their changes during the corrosion processes. The paper makes the detailed inventory to major prerequisites of the structure strength decreasing and attributes the basic amplification mechanisms. Veracious methodologies for modelling the stress-strain state changes in corroded reinforced concrete elements are described. Finally, in the article the perspective fields for further research are outlined and recommendations for further experimental and theoretical studies are given.

Ключові слова: корозія, арматура, залізобетонні елементи, напружено-деформований стан
corrosion, reinforcement, reinforced concrete elements, stress-strain state.

Вступ. Характерними особливостями будівельної індустрії є значні капітальні вкладення, необхідні для нового будівництва та залежність від зовнішніх факторів: як науково-технічного розвитку, так і світового економічного ринку. Відповідно, останнім часом можна спостерігати тенденцію в будівельному виробництві до максимального використання наявних житлових і промислових будівельних фондів, їх оптимізації, реконструкції, підсилення [1,2]. Залізобетонні конструкції займають значне місце як в вітчизняному, так і в світовому будівельному виробництві [3,4,5,6]. Борисюк і Christodoulou в своїй статтях [7,8] зазначають, крім того, що залізобетон, як будівельний матеріал є, наразі, одним із найбільш поширено застосовуваних для конструкцій різного призначення; очевидно, техніко-економічні аспекти оптимального відновлення його фізико-механічних параметрів мають велике практичне значення. Особливу увагу при розробці рішень з відновлення і підсилення необхідно приділяти залізобетонним елементам і можливим їх корозійним пошкодженням.

Постановка мети досліджень. Основною метою роботи є детальний огляд наявних експериментальних і теоретичних досліджень впливу корозійних дефектів на напружено-деформований стан залізобетонних елементів, аналіз і систематизація результатів наукових робіт. Також завданням дослідження є окреслити перспективні напрямки розвитку даної теми і надати рекомендації для подальших експериментальних і теоретичних досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Дослідженням властивостей залізобетону як найбільш поширеного на сьогодні конструкційного матеріалу, особливостям розвитку корозійних процесів в ньому присвячено значну кількість експериментальних і теоретичних наукових робіт [9-14]. Специфічні позитивні властивості залізобетону як будівельного матеріалу досягаються за рахунок синергічної взаємодії його окремих компонентів, а саме: сприйняття основних стискальних зусиль бетонним каменем, а зусилля розтягу,-арматурою, відповідне їх взаємодоповнення. Як стверджується в роботі [9] двокомпонентний характер матеріалу значним чином ускладнює розподіл деформацій і внутрішніх зусиль, несилкових впливів.

Корозійні пошкодження залізобетонних конструкцій є наразі нагальною проблемою як будівельної індустрії, так і світової економіки в цілому.[10,11]. Так, європейські і американські дослідники значну увагу акцентують на значній кількості паталогічних впливів корозійних процесів на об'єкти інфраструктури[12,13,14]. В ряді робіт [15,8,3] наведено порівняльний аналіз основних методів відновлення і ремонту залізобетонних конструкцій, пошкоджених агресивним середовищем, а саме- катодний захист та імпрегнація гідрофобним речовинами. Однак, як засвідчено в роботі Mufid Samarai, 2019 та ін. [16], ефективність певного методу підсилення необхідно оцінювати в контексті конкретної ситуації, з урахуванням як умов роботи елемента, так і способу його навантаження.

Оскільки коректне формулювання рішень з реконструкції можливе лише при комплексній оцінці конкретного конструктивного елемента, то визначення його напружено-деформованого стану постає наразі нагальною проблемою [17,18]. Зовнішні впливи агресивного навколишнього середовища змінюють як кількісні, так і якісні параметри зусиль в конструкції, і відповідно, ускладнення розрахункової схеми. Очевидно, що оцінка впливу корозійних процесів на кінетику зміни деформативних і міцнісних характеристик елемента становить особливе теоретичне і практичне значення для створення можливостей раціонального проектування.

Наразі дослідження сумісної дії на залізобетонний елемент агресивного середовища і локального навантаження не мають ані достатньої експериментальної бази, ані достовірного теоретичного обґрунтування. Методика оцінки цих небезпечних факторів, що запропонована в нормативних документах значно завищує несучу здатність кородованих залізобетонних конструкцій, що і було підтверджено натурними випробуваннями залізобетонних зразків [19]. В роботі відзначене зростання деформативності зразків при сумісній дії на них локального навантаження і сірчаної кислоти. З огляду на вище наведене, вплив корозії на арматурну складову даної системи, проявляється комплексними змінами напружено-деформованого стану конструкції загалом [20].

Наприклад, як зазначено в роботах ([21-25]) залізобетонні конструкції, як правило, експлуатуються в досить складних умовах навантаженнях, що включають як значні постійні і короточасні (сейсмічні дії) силові впливи, так і несилові впливи від навколишнього середовища, відповідно характерним є накопичення пластичних деформацій і ускладнення розрахункової схеми і необхідність використання досить складних математичних моделей. Також, як було зазначено в роботі [26] важливим є врахування роботи залізобетонного елемента не як ізольованого об'єкту, що піддається зовнішнім впливам, а як частини комплексної конструкції. Окремі дослідження присвячено впливам наявних дефектів в залізобетонних центрально-навантажених елементах на зміну розташування площини силового впливу і появу неврахованих згинальних зусиль в елементах. Експериментальні випробування таких конструкцій вказали принципову зміну розрахункової схеми і крихкий характер руйнування [2].

Метою роботи Zandi H., 2010 [25] було поглиблення розуміння поведінки конструкції при різних рівнях її пошкодження. Автор також звертає увагу на підвищений тиск від продуктів корозії в порах і зниження адгезії між бетоном і арматурою як основні каталізatori виходу елемента із стадії нормальної роботи.

Окрему увагу необхідно приділити змінам НДС в попередньо напружених залізобетонних елементах. В останніх дослідженнях за допомогою нововведеної симуляційної моделі проведено докладний аналіз комплексного явища локальної корозії в арматурі і бетоні і відповідного одночасного зниження міцнісних характеристик і втрат попереднього напруження. Необхідно зазначити, що критичним параметром, що спричиняє стрибкоподібне зниження несучої здатності елемента є досягнення корозії конкретного рівня з наступним різким зниженням інтерфазової взаємодії компонентів матеріалу. [26]

Ряд робіт [4, 10, 11, 27-31] присвячено хімічним аспектам змін в структурі матеріалу і кінетиці цих змін залежно від багатьох факторів. Автори Fouzia B. et, al, 2019 [11] наголошують, що, незважаючи на те, що окремі складові бетону є досить стійкими до впливів лужних подразників у випадку впливу на них конкретних термічних і хімічних параметрів навколишнього середовища утворюється своєрідна гелева фаза, яка призводить до утворення мікротріщин в цементному камені і крихкого характеру його руйнування.

Згідно з авторами [9] однією з основних причин втрати несучої здатності залізобетонної конструкції є лужно-агрегатні реакції, серед яких особливу увагу необхідно приділити процесам вилугування, впливам розчинених солей і кислот, а також накопиченню гелевих продуктів лужно-кремнеземистих реакцій, що призводять до підвищення внутрішніх тисків і подальшого розтріскування бетонного каменя. Зазначено [9], що для достовірного визначення параметрів НДС залізобетонних елементів з

врахуванням корозійних процесів необхідно розробити комплекс досліджень, що включатиме: польове обстеження споруд, виявлення наявності і розподілу дефектів, умови агресивних впливів, моніторинг кінетики деградації критичних ділянок, ряд лабораторних тестів (включаючи петрографічну характеристику, хімічні, фізичні та механічні випробування) на зразках, зібраних з одного або декількох компонентів ураженої бетонної конструкції.

В роботі Geiker M. R., 2012 та ін. [27], проаналізовано процес хлоридної корозії як один з основних аспектів проектування залізобетонних елементів в умових багаторазового зволоження, замороження і відтавання. Авторами запропоновано ймовірнісний метод для моделювання напружено-деформованого стану, а також стверджується, що вирішальним фактором можуть бути мікроструктурні властивості матеріалу, особливо мікротріщини і пори, що утворюють проникні шляхи. Крім того корозійний процес може бути пришвидшений динамічними навантаженнями, що спричиняють додатковий тиск в насичених тріщинах [28].

Хлоридна корозія також була досліджена Ayinde O. O. та ін., 2019 [29] із застосуванням методів скінченно-елементного аналізу і ABAQUS-симуляції. Аналіз деградаційних процесів в залізобетонних елементах і змін деформівних параметрів конструкції вказує, що тиск від продуктів корозії на межі фаз, визначався рівномірними радіальними переміщеннями і розтріскуванням суміжних шарів бетону.

Webster M. P., 2000 [30] в своїй роботі представив аналіз механізмів хлоридної корозії для різних типів будівельних конструкцій, що дозволило відслідкувати зміни в тріщиностійкості залізобетонних елементів і запропонувати напрямки оптимізації моделей конструкцій і матеріалів, застосованих в BS 8110, BD 57, BS 5400.

На відміну від вище перелічених авторів, Teplý V. і Novák D., 2012 [31] зосередили свою увагу на карбонатному типі корозії. Карбонатна корозія залізобетонного елемента загалом визначається процесами дифузії з навколишнього середовища і його подальшої реакційної здатності з бетоном з відповідним зниженням рН до 8,3. При досягненні глибини карбонізації товщини захисного шару починаються процеси депасивації арматури в бетоні і її подальшої корозії. Швидкість настання такого критичного стану залежить від багатьох параметрів, наприклад товщини та проникності бетонного покриття, температури навколишнього середовища, відносної вологості і вмісту діоксиду вуглецю, тоді як сама проникність бетонного покриття залежить від типу та складу бетонної суміші, градації заповнювачів, умов тужавіння, і т.ін. Для врахування корозійних процесів при моделюванні НДС залізобетонного елемента всі вище перераховані параметри необхідно представляти як випадкові змінні певного діапазону [31]. В роботі [4] також досліджено карбонізаційну корозію цементного каменю, запропоновано метод числового моделювання процесів деградації матеріалу і методуку

прогнозування зниження несучої здатності залізобетонних елементів в умовах високої концентрації .

Також важливим напрямком в даній проблемі є достовірне визначення повного поля деформацій, як одного з компонент напружено-деформованого стану залізобетонного елемента. Загальна характеристика основних наявних методів вимірювання деформацій, наведена в роботі Le D. B. та ін., 2017 [32] приводить до висновку, що з огляду на складність даного випадку доцільним є використання певної комбінації різних підходів.

Згідно з [33] багатообіцяючим підходом до оцінювання корозійних пошкоджень на міцнісні характеристики є неруйнівні методи на основі магнітного потоку. Достовірність такої концепції перевірялась числовим моделюванням методами скінченних елементів (ANSYS Maxwell) і експериментальними випробуваннями, причому було отримано досить високу кореляцію між фактичними отриманими і очікуваними даними.

Очевидною є також доцільність подальшого впровадження методів симуляції корозійних процесів на основі ймовірнісних підходів. Ймовірнісний підхід забезпечує докладну якісну і кількісну інформацію про рівень надійності конструкції і, в комплексі з моделюванням процесів деградації матеріалу, дозволяє досить точно прогнозувати кінетику зміни НДС структурних елементів. Основною перешкодою для впровадження такої методики в практичне застосування в умовах реального проектування є велика кількість несистематизованих ймовірнісних моделей для таких процесів і, відповідно, значний обсяг вхідних даних для більш складного математичного моделювання.

В статті Terplý V. і Novák D., 2012 [31] висвітлено питання врахування впливів навколишнього середовища на розрахункову ситуацію і достовірної ідентифікації граничних умов роботи залізобетонних конструкцій. На основі комплексно проведеного ймовірнісного моделювання з використанням відповідного програмного забезпечення (програмні комплекси RC LifeTime, FReET-D) автори прийшли до висновку щодо необхідності перегляду аспектів визначення обох груп граничних станів (ULS і SLS), що викладені в міжнародних нормативних документах.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В статті проведено детальний огляд і аналіз наявних експериментальних і теоретичних досліджень впливу корозійних дефектів на напружено-деформований стан залізобетонних елементів, аналіз і систематизація результатів наукових робіт. На основі основних наукових надбань і наробок вітчизняних і іноземних дослідників можна стверджувати, що корозійні дефекти в арматурі значним чином ускладнюють напружено-деформований стан, знижують несучу здатність конструкції, що необхідно враховувати під час прийняття рішень з реконструкції і підсилення. Необхідно зауважити, що оцінка змін напружено-деформованого стану залізобетонної конструкції передбачає ґрунтовне

багатофакторне дослідження з урахуванням багатопараметричних умов: тип зразка, характер зовнішнього навантаження (згин, центральний чи позацентровий стиск), час протікання хімічних реакцій, особливості агресивного середовища, температура, тощо. На основі проведеного огляду літератури можна стверджувати, що доцільним є продовження експериментальних і теоретичних досліджень для формування відповідної методики врахування таких дефектів для подальшого практичного застосування.

1. Tryapitsin Y., Pakhomov V., Voinov S./ Analysis and regulation of the stress-strain state of structures with reliability. E3S Web of Conferences, vol. 138, № 01016(2019),CATPID-2019/URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801016> (last access: 09.02.2020).

2. Вискобійник О.П., Кітаєв О.О., Макаренко Я.В., Бугаєнко Є.С. Експериментальні дослідження залізобетонних балок з дефектами та пошкодженнями, які викликають косий згин. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), 2011.- Вип. 1 (29), ст. 87-92.

Vyskobiynuk O.P., Kitaev O.O., Makarenko YA.V., Bugaenko E.S. /Experimental investigations of reinforced concrete beams with defects and damages that cause a sloping bend. Collection of scientific works (industry engineering, construction), 2011. - Issue. 1 (29), pages 87-92.

3. Christodoulou C., Goodier C. I./ Corrosion management of reinforced concrete structures. Loughborough University's Institutional Repository- Concrete (London), UK-2014-pages.37-39.

4. Mongelós. P. D. B. /Maintenance support strategies for reinforced concrete structures under corrosion risk. Doctoral thesis. Universidade de Aveiro Ano, 2018. Departamento de Engenharia Civil.-221 p.

5. Bobalo T., Blikharsky Y., Kopyika N., Volynets M./ Theoretical analysis of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. vol.708-012045

6. Бабич Є. М./ Розрахунок і конструювання залізобетонних балок : навч. посіб. / Є. М. Бабич, В. Є. Бабич. – 2-ге вид. перероб. і доп. – Рівне : НУВГП, 2017. – 191 с.

Babych E.M., Babych E.M./ Calculation and construction of reinforced concrete beams: textbook. - 2nd ed. - Rivne: NUVGP, 2017. - 191 p.

7. Борисюк, О. П., Ю. Ю. Зятюк./ Напружено-деформований стан залізобетонних балок підсилених під навантаженням сталеві фібробетоном і композитами при дії малоциклових навантажень. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди № 33 (2016), ст. 303-313.

Borisyk, O.P., Zatiuk Yu. Y./ Stress-deformed state of reinforced concrete beams reinforced under load with steel fiber and composites under the action of low-cycle loads. Resources, Materials, Structures, Buildings and Structures № 33 (2016), pages 303-313.

8. Christodoulou, C./ Repair and Corrosion Management of Reinforced Concrete Structures. Loughborough's Research Repository, Loughborough University. EngD thesis, 2019./ URL: <https://hdl.handle.net/2134/13577>.

9. Indeitsev D.A., Porubov A.V., Skubov D. Yu., Lukin A.V., Popov I.A., Vavilov D.S./ On the influence of the microstructure on stress-strain state of the material. *Materials Physics and Mechanics*, vol. 35, 2018, pages66-70.

10. Воскобийник О.П./Типологічне порівняння дефектів та пошкоджень залізобетонних, металевих та сталезалізобетонних балкових конструкцій Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"- 2010. - № 662. - ст. 97-103.

Voskobiynyk O.P./ Typological comparison of defects and damages of reinforced concrete, metal and steel-reinforced concrete beam structures. *Nat. Lviv Polytechnic University Journal* - 2010. - № 662. - pages 97-103.

11. Воскобийник О.П./Класифікація дефектів сталезалізобетонних каркасів. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение.-Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.- 2012.- Вып. 65.- ст. 155-160.- Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2012_65_25/*

Voskobiynyk O.P./ Classification of defects of steel-concrete frames. *Construction. Material science. Mechanical Engineering. - Series: Innovative Technologies for the Life Cycle of residential, civil, industrial and transport objects. 2012. Issue.65.- pages 155-160.- Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2012_65_25*

12. ThomasM.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J. *Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book (No. FHWA-HIF-13-019)*, 2013, United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.

13. Fouzia B., Fouzi H.M., Nouredine F./ *Concrete Structures and the Aggressive Environments: Experimental and Numerical Simulation// Conference: International Conference on Water, Informatics, Sustainability, and Environement iWISE2019, At: Carleton University – Ottawa, August 2019*

14. Habita M. F./ *Contribution to the Study of the Alkali-Silica-Reaction Effect, on the Mechanical Behaviour of Reinforced Concrete Beams. 1992. PhD Thesis. Thesis for obtaining of doctorate diploma.*

15. Christodoulou, C./ *Repair and corrosion management of reinforced concrete structures, EngD Thesis, Loughborough University, 2013.*

16. Samarai M., Saad R., Amer O., Tahmaz A., Marei Y./ *Repair of major faculty concrete structures, 2019. International Operations & Maintenance Conference 2019 17th Edition . At: Dubai - United Arab Emirates, 4 p.*

17. Varlamov A., Rimshin V., Tverskoi, S./ *A method for assessing the stress-strain state of reinforced concrete structures. EDP Sciences. In E3S Web of Conferences, 2019. Vol. 91, pages. 02046.*

18. Бліхарський, Я. З., Копійка, Н. С./ *Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2019 (37), ст. 316-322.*

Blikharskyu Y.Z., Kopyika, N.S./ *Research of damaged reinforced concrete elements, basic methods of their restoration and strengthening. Resource-saving Materials, Structures, Buildings and Structures, 2019 (37), pages. 316-322.*

19. Хміль Р. Є., Вашкевич Р. В., Бліхарський Я. З./ *Напружено-деформований стан залізобетонних балок, пошкоджених агресивним середовищем. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2009. № 655: Теорія і практика будівництва. ст. 278–285.*

Khmil R.E., Vashkevych R.V., Blikharsky J.Z./ Stress-deformed state of reinforced concrete beams damaged by the aggressive environment. Bulletin of the "Lviv Polytechnic" National University, 2009. № 655: Theory and practice of construction. pages 278–285.

20. Бліхарський Я.З., Копійка Н.С./ Дослідження методик моніторингу і моделювання корозійних процесів в залізобетонних елементах. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2019. Вип. № 77. ст.29-37.

Blikharsky Y.Z., Kopyika N.S./ Investigation of methods of monitoring and modeling of corrosion processes in reinforced concrete elements. Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2019. Vol. 77. pages 29-37.

21. Sidorov D., Dorozhinskiy V./ Comparison of the stress-strain state of the reinforced concrete structure under various mathematical models of concrete. MATEC Web of Conferences 251, 04032. 2018. IPICSE-2018. pages 1-5.

22. Radchenko A., Radchenko P., Batuev S., Plevkov V./ Modeling of fracture of reinforced concrete structures under impact. Architecture and Engineering.2019. Vol. 4, Issue 3,pages 22-29.

23. Tryapitsin, Y., Pakhomov, V., Voinov, S./ Analysis and regulation of the stress-strain state of structures with reliability. In E3S Web of Conferences Vol. 138, pages01016. EDP Sciences.

24. Ткачук, І. А. Несна здатність залізобетонних згинаних конструкцій при силових, деформаційних та високотемпературних впливах. Дороги і мости, (11), 2009. ст. 349-353.

Tkachuk, I.A/ Carrying capacity of reinforced concrete bent structures under power, deformation and high temperature influences. Roads and Bridges, (11), 2009. pages 349-353.

25. Zandi, H. K. Structural behaviour of deteriorated concrete structures. Doctor of Philosophy. 2010./ Available through: [http://dx. doi. org/10.1016/j. cemconres. 2010.11. 007](http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.007) (Accessed on 10.02.2020).

26. Dai, L., Bian, H., Wang, L., Potier-Ferry, M., Zhang, J./ Prestress Loss Diagnostics in Pretensioned Concrete Structures with Corrosive Cracking. Journal of Structural Engineering, 2020. Vol. 146, Issue 3, 04020013. pp. 1-11.

27. Geiker M. R., Justnes H./ Prediction of chloride induced corrosion for service life modeling. International Congress on Durability of concrete, 2012. 12 p.

28. A. Küter, M. R. Geiker, J. F. Olesen, H. Stang, C. Dauerschmidt, and M. Raupach./ Chloride Ingress in Concrete Cracks under Cyclic Loading. in Proceedings of Third International Conference on Construction Materials, ConMat'05, Vancouver, Canada. 22nd – 24th of August, 2005.

29. Ayinde O. O., Zuo X. B., Yin G. J./ Numerical analysis of concrete degradation due to chloride-induced steel corrosion. Advances in concrete construction, 2019. Vol. 7- Issue 4, pages 203-210.

30. Webster, M. P. The assessment of corrosion-damaged concrete structures (Doctoral dissertation, University of Birmingham). 2000. 318 p.

31. Teplý B., Novák D./ Limit states of concrete structures subjected to environmental actions. Engineering Mechanics, 2012. Vol. 99,pagespages 1363–1367.

32. Le D. B., Tran, S. D., Dao, V. T., Torero, J./Deformation capturing of concrete structures at elevated temperatures. Procedia engineering, 210, 2017 pages 613-621.

33. Elyasigorji A., Rezaee M., Ghorbanpoo, A./ Magnetic Corrosion Detection in Concrete Structures. In International Conference on Sustainable Infrastructure, 2019. p. 175.