УДК 624.012 DOI: 10.31650/2415-377X-2019-77-29-37

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК МОНІТОРИНГУ І МОДЕЛЮВАННЯ КОРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Бліхарський Я.З., к.т.н., асистент,
Yaroslav.Z.Blikharskyy@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-3374-9195
Копійка Н.С., студентка,
kopijka.nadija.1999@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2270-4028
Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація. В статті проведено детальний огляд і аналіз наявних наукових робіт, експериментальних досліджень, спрямованих на вирішення проблеми моніторингу, моделювання, прогнозування корозійних процесів в залізобетонних елементах. За мету в роботі поставлено провести порівняльний аналіз наявних теорій і методик оцінки кінетики корозійних процесів в сталевій арматурі, ідентифікувати їх переваги і недоліки надати рекомендації щодо удосконалення. Додатково проведено систематизацію і класифікацію науково-дослідних розробок, а також визначено основні перспективні напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: корозія, залізобетонні конструкції, моделювання, швидкість корозії, методи досліджень.

Вступ. На сьогодні залізобетон є одним з найбільш поширених матеріалів, що застосовуються в будівельних конструкціях [1-3]. Властивості залізобетону, як синергічної системи визначаються сумісною роботою бетону і арматури й оптимальним використанням характеристик цих складових, їх двостороннім взаємодоповненням та нівелюванням недоліків [4, 5]. Найбільш наочно це проявляється у здатності цементного каменю до пасивації арматурної сталі. Ця властивість є однією з передумов значної довговічності залізобетонних конструкцій і їх стійкості до негативних зовнішніх впливів. Однак, значною кількістю наукових досліджень [1, 5] підтверджено, що ця властивість значно знижується із часом при наявності впливів атмосферної вологи, солей й інших активаторів корозії.

З огляду на тенденцію до досить поширеного використання залізобетонних конструкцій поза межами проектного терміну [6] в умовах наявних впливів хімічної, електрохімічної чи біохімічної агресії проблема оцінки впливу корозійних процесів є надзвичайно актуальною. Таким чином, велика кількість досліджень присвячена аналізу напружено-деформованого стану елементів у випадку їх пошкоджень загалом, так і частковим випадкам корозійних дефектів. [7-9].

Наразі накопичено значний обсяг результатів як експериментальних, так і теоретичних наукових робіт, однак відсутність систематичного аналізу цих знань визначає перешкоди в повноцінному використанні їх потенціалу.

Постановка мети досліджень. Враховуючи загострення проблеми цілісності залізобетонних конструкцій у випадку корозії сталевої арматури за мету роботи поставлено огляд наявної бази наукових досліджень цього напрямку. В статті проведено аналіз запропонованих в літературі методик прогнозування й моніторингу корозійних процесів і їх впливів на несучу здатність арматури в залізобетонних конструкціях. З огляду на значний обсяг науково-дослідних розробок, проведена їх систематизація і класифікація, а також визначено основні перспективні напрямки подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень. В загальному випадку термін «корозія» асоціюють з процесами швидкого чи повільного руйнування матеріалів під впливом агресивних чинників різного характеру [10, 11]. На сьогоднішній день розроблено основи теорії корозії в бетоні й арматурі, визначено основні принципи і передумови протікання цих процесів.

Загальноприйнята концепція передбачає розгляд корозії як процесу у збалансованій системі, що протікає згідно до законів кінетики термодинамічних реакцій і спрямований на зниження вільної енергії матеріалу. Таким чином, продуктом модифікації сталевої арматури під впливом агресивного середовища є стійкіші в термодинамічному відношенні сполуки. Так, в серії досліджень описаних в роботах E. Sola et. al., 2016, [12] та J Ožbolt et. al, 2019 [13]. розглянуто хлоридну корозію як електрохімічний процес, залежний від електропровідності міжфазової поверхні бетону та арматури. Також відмічено значний вплив наявності та електропровідних властивостей електролітів у складі цементного каменю, а також розчиненого кисню, що контактує з поверхнею сталевої арматури. Автори пропонують методику симуляції корозійних процесів на основі хіміко-гідро-термомеханічної 3D моделі, підтверджуючи її достовірність результатами експерименту.

На противагу вище наведеному, Kheira Ouzaa та Chahmi Oucif [4] в своїй роботі основну увагу приділяють концентрації іонів хлору в цементному камені і наявності мікротріщин до процесу деградації матеріалу. Таким чином, запропоновано 2-факторну залежність для математичного моделювання корозії. В роботі [4] запропонована чисельна модель корозійного процесу, що враховує ступінь поглинання іонів Cl^- як передумову різкого пришвидшення втрати маси.

Необхідно відмітити, що, незважаючи на значну кількість запропонованих математичних моделей, досить складно запропонувати одну загальну теорію чисельного прогнозування процесу корозії. Так в роботі [5] авторами зроблено спробу апробації декількох функціональних залежностей для процесу корозії, запропонованих різними літературними джерелами. Експерименти P Koteš et. al. [5] засвідчили контраверсивність отриманих результатів, що могла бути спричинена як проблемою вибору основного аргументу для функції моделювання, так і різними формами цих функцій (лінійна, експотенціальна й поліноміальна залежності).

Важливим аспектом, який необхідно враховувати при числовому або експериментальному моделюванні корозії є мікроструктурні, електрохімічні і механічні характеристики конкретного матеріалу. Корозійна стійкість різних класів арматурної сталі і сплавів визначається співвідношенням різнорідних компонентів, наявних в їх складі, рівнем подрібнення окремих зерен, що і визначає енергетичну стійкість системи. Так, ряд робіт [14, 15] присвячено дослідженню сплавів на основі Ni, що на сьогодні є широко застосованими в інженерній практиці. Yuejuan Shi et. al [14] зазначають в своїй статті високу стійкість таких сплавів до дії сірчаної кислоти як агресивного чинника навколишнього середовища. Експериментальна симуляція показала нелінійне пришвидшення процесу при збільшенні концентрації кислотного агента на окремих ділянках, що, однак, не перевищила аналогічні показники для високоміцної сталі. В роботі [15] увагу приділено методам модифікації сплавів на основі нікелю електропроменевою технологією і засвідчено негативний вплив мікроструктурної неоднорідності верхнього зміцненого шару.

В роботі [16] також приділено увагу експериментальним дослідженням аустенітних нержавіючих сталей, а головним чином – зміні їх корозійної стійкості залежно від технології обробки і зміцнення. Автори в [16] на основі систематизації результатів експерименту підтверджують сповільнення декорбанізації в матеріалі і, відповідно, зниження темпів як загальної, так і міжкристалічної корозії.

З огляду на значні складнощі виявлені при спробах розробки числового методу аналізу корозійних процесів, в наукових колах наявний також принципово інший підхід до моделювання даного процесу. Запропоновано [17, 18] з використанням надчутливих вимірювальних приладів і спеціально розроблених методик моніторингу процесів корозії запровадити систематизований збір даних щодо особливостей деградації різних класів сталей під впливом агресивного середовища. Наприклад, Aparna Jagtap і Chittaranjan Nayak стверджують у своїй статті [17] про ряд змінних параметрів, таких як водоцементне відношення, електрохімічні параметри мікро- і макроструктури, концентрація розчинених

речовин, що роблять практично неможливим достовірне передбачення типу корозії, що матиме місце в кожному конкретному випадку. Натомість, для високоточного контролю за процесом корозії рекомендовано застосування спеціальних чутливих сенсорів, вживлених в масив елемента залізобетонної конструкції. Подібна методика згадана в роботі [18], де, однак, технологія моніторингу Брага заснована на змінах деформативних характеристик сталевих фібр на різних етапах корозії.

Греділь М.І. в своїй роботі [6] описує метод збору даних про кінетику протікання процесу в лабораторних умовах за пришвидшеною поляризаційною методикою. Інтенсивність контролюється шляхом реєстрації струму корозії і відзначення характерної ділянки критичного тиску. Запропонована методика, таким чином дозволяє спрощеними засобами отримати досить точний результат про корозійну тривкість арматури, ефективність корозійного захисту та механічний опір бетону розтріскуванню [6].

Детальний аналіз локальних електрохімічних технологій (SVET, LEIS, SECM, SKP, SIET, SDS) в [19-20] показав високий рівень точності їх результатів за рахунок нівелювання зовнішніх глобальних негативних факторів. Автори надають рекомендації з удосконалення програмного забезпечення і лабораторного обладнання, що застосовується при моніторингу корозії за цими методиками і більш точного окреслення їх в нормативних документах (ASTM, ISO etc.).

Докладне порівняння в [19] методик моніторингу процесів корозії методами спектрального аналізу з використанням відповідного програмного забезпечення (XPS, SEM, AFM – аналіз) показав високу кореляцію з даними електрохімічного аналізу, що свідчить про значний потенціал даного напрямку.

Поширеним є також метод оцінки корозійного процесу на основі різниці електронних потенціалів електродного потенціалу гальванічної пари „арматура-бетон” з еталонним значенням параметрів для ізольованого мідносульфатно насиченого елементу, так званого „електроду порівняння” [21]. Такий підхід дозволяє ідентифікувати критичні зони поширення корозії, однак надає досить обмежені можливості для аналізу інтенсивності цього процесу. Сташук П.М [22] як оптимальну альтернативу пропонує використання акустично-емісійного методу, на основі випромінювання пружних хвиль у твердих тілах при їх деформуванні. Значною кількістю дослідників [22-24] підтверджено можливість діагностування електрохімічної корозії, визначати кінетику руйнування матеріалів, її стадії і механізми. Електрохімічні методи дослідження корозії також розглянуті в статті Герасименка та ін. [25], де наведено докладний аналіз теоретичних і практичних напрацювань з розвитку поляризаційного методу досліджень.

Окремим фактором, що враховується при оцінці імовірності поширення корозійних процесів ступенем, вище за гранично допустимий особливості захисного покриття застосованого в арматурі [26]. Для оцінки цього параметру необхідно аналізувати дані послідовних експериментальних досліджень, приділяючи основну увагу імерсійній здатності матеріалу покриття.

Хімічні обмінні процеси, що наявні при взаємодії кородованого матеріалу і агресивного середовища характеризується широким спектром непередбачуваних факторів, що ускладнює спроби їх моделювання. Особливо критичним це постає для елементів залізобетонних і сталевих конструкцій, що безпосередньо контактують з речовинами високої кислотності [27-30]. Так в дослідженнях магістральних сталевих трубопроводів останнім часом значно актуалізувалась проблема оцінки фактичної і прогнозування майбутньої глибини поширення корозії. В [27] наведено математичну модель втрати маси, що базується на визначальній ролі макрогальванічних пар незалежно від хімічного складу електроліту. Натомість, Luciano D. Paolinelli й Srdjan Nesic [28] звертають увагу на особливий вплив градієнту швидкостей в межах поперечного перерізу трубопроводу. Так, в статті пропонується методика на основі аналогії Чілтона-Колберна, що враховує дифузійні процеси при перенесенні рідкого агресивного середовища і, відповідно, неоднорідність поширення кородованого шару. В

роботах Клименка [29] та Коваленка та ін. [30] наведені результати ґрунтовних досліджень корозійних процесів в магістральних трубопроводах з урахуванням особливостей агресивного середовища, в яких експлуатується матеріал.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В статті наведено результати детального огляду літератури, наявних розробок, експериментальних досліджень у сфері моніторингу, моделювання і прогнозування поширення корозійних процесів. Можна зробити висновок, що докладні теорії корозійних процесів і значна база даних експериментальних вимірювань на сьогодні не знаходить місця в практичному застосуванні через відсутність ґрунтовної класифікації і систематизації інформації. Ідентифіковано наявні методики числового моделювання, зазначено їх основні позитивні сторони і недоліки. Визначено, що використання теоретичних алгоритмів прогнозування корозії є практично неможливим без зведення загальних концепцій розрахунку до локальних для кожного часткового випадку. За критерії такої локалізації можна прийняти конкретні хіміко-механічні властивості матеріалу, особливості агресивного середовища, а такою напружено-деформований стан елемента в умовах його експлуатації. Можна стверджувати, що спроби сформулювати універсальну теорію моделювання корозійного процесу засвідчили свою низьку ефективність і низьку достовірність результатів.

Доцільними є наступні рекомендації:

– вибір методів моніторингу і моделювання процесів корозії залежно від рівня агресивності навколишнього середовища, енергетичної збалансованості системи, електрохімічних потенціалів її складових;

– при чисельному моделюванні використовувати функціональні залежності з малою кількістю аргументів, оскільки використання багатофакторних залежностей спричиняє значне зниження точності результатів;

– необхідним є проведення натурних досліджень при забезпеченні однакових умов при проведенні експерименту для однорідності отриманих даних.

Методика моделювання корозійних процесів при відповідному її удосконаленні і апробації експериментом може бути застосована в практичних розрахунках при визначенні фактичної несучої здатності елемента, пошкодженого корозійними впливами. Відповідно, можна рекомендувати подальший як теоретичний, так і експериментальний розвиток даної проблеми.

Література

1. Bobalo T., Blikharskyy Y., Kopiika N., Volynets M. Serviceability of RC Beams Reinforced with High Strength Rebar’s and Steel Plate. Lecture Notes in Civil Engineering, 2019. Vol 47, pp. 25-33.

2. Воскобійник О.П. Типологічне порівняння дефектів та пошкоджень залізобетонних, металевих та сталезалізобетонних балкових конструкцій. Вісник національного ун-ту «Львівська політехніка». 2010. № 662. С. 97-103.

3. Воскобійник О.П., Пархоменко І.О., Томілін Я.О. Особливості роботи трубобетонних стійок із корозійними пошкодженнями сталевої оболонки. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. 2011. Вип. 1. С. 93-98.

4. Ouzaa K., Oucif C. Numerical model for prediction of corrosion of steel reinforcements in reinforced concrete structures. Underground Space. 2019. Vol. 4. Issue 1, pp. 72-77.

5. Koteš P., Strieška M., Brodňan M., Odrobiňák J., Gocál J. Rapid tests of corrosion in corrosion chamber. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. https:///doi:10.1088/1757-899X/365/5/052013.

6. Греділь М.І. Експрес-методика оцінювання впливу корозії арматури на цілісність залізобетону. Фізико-хімічна механіка матеріалів (Physicochemical Mechanics of Materials).

2013. Вип. 3. С. 102-104.

7. Sadeghi K., Nouban F. Damage and fatigue quantification of RC structures. Structural Engineering and Mechanics. 2016. 58 (6), pp. 1021–1044.

8. Лободанов М.М., Вегера П.І., Бліхарський З.Я. Аналіз впливу основних видів дефектів та пошкоджень на залізобетонну здатність залізобетонних елементів. Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Теорія і практика будівництва». 2018. № 888. С. 93-100.

9. Chien‑Kuo C., Hsin‑Fang S., Kai‑Ning C., Fu‑Pei H. Experimental Quantification on the Residual Seismic Capacity of Damaged RC Column Members. Int J Concr Struct Mater. 2019. Vol. 13 (17). https://doi.org/10.1186/s40069-019-0338-z.

10. Kang Seok L. An Experimental Study on Hybrid Noncompression CF Bracing and GF Sheet Wrapping Reinforcement Method to Restore Damaged RC Structures. Hindawi Publishing Corporation-Shock and Vibration. 2015. Volume 2015. http://dx.doi.org/10.1155/2015/202751.

11. Шмігель Р. В. Дослідження факторів скорочення строку експлуатації залізобетонних циліндричних резервуарів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2014. Вип. 29. С. 512-517.

12. Sola E., Ožbolt J., Balabanic G. Modelling Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete: Natural vs. Accelerated Corrosion. Conference Paper: 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. 2016. https://doi.org/10.21012/FC9.097.

13. Ožbolt J., Balabanić G., Oršanić F. Modelling corrosion of steel reinforcement in concrete. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 615. https://doi:10.1088/1757-899X/615/1/012011.

14. Shi Y., Liu Y., Wang X., Zhou Y., Ma J., Zhang Sh. Corrosion Study on Ni-based Alloy in Acidic Environment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 611. https:///doi:10.1088/1757-899X/611/1/012008.

15. Sroka M., Jonda E., Węglowski M., Błacha S. The Corrosion Studies of Electron Beam Welded Nickel Alloy. Matec Web of Conferences. 2019. Vol. 253. https://doi.org/10.1051/matecconf/201925303005.

16. Jebaraj P.M., Srinivasan M. General and Intergranular Corrosion of Austenitic Stainless Steel Castings. Corrosion-Houston Tx. 1989. Vol. 45, Issue 11, pp. 938-942.

17. Jagtap A., Nayak C. Corrosion Monitoring of RCC Structure by Using Corrosion Expansion Sensor. Springer Nature Switzerland AG. 2020, Vol. 20, pp. 205-216.

18. Cinitha A., Sampath V., Kesavan K. Strain monitoring of low carbon steel in a corrosive environment using fiber Bragg technology. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 217. Issue 30, pp. 265-272.

19. Jadhav N., Gelling V. J. Review: The Use of Localized Electrochemical Techniques for Corrosion Studies. Journal of the Electrochemical Society. 2019. Vol. 166. Issue 11, pp. 3461-3476.

20. Ryl J., Wysocka J., Krakowiak St. Examples of XPS analysis in corrosion studies. Gdansk University of Technology Conference Paper- Faculty of Chemistry-Escalab 250Xi in GUT. 2017.

21. Сташук П.М. Дослідження акустичної емісії під час електрохімічної корозії арматури залізобетонних конструкцій. Дороги і мости. Київ, 2008. Вип. 8. С. 246-253.

22. Муравин Г.Б., Палей Ю.М., Макарова Н.О., Левитина И.Г. Разработка акустико – эмиссионного метода идентификации коррозии. Дефектоскопия. 1991. № 1. С. 58-65.

23. Муравин Г.Б., Лезвинская Л.М., Макарова Н.О., Павловская Г.С. Задачи акустико – эмиссионной диагностики процесса коррозии. Дефектоскопия. 1990. № 2. С.18-28.

24. Муравин Г.Б., Финкель В.М., Лезвинская Л.М., Симкин Я.В. Исследование деформирования кремнистого железа методом акустической эмиссии. Дефектоскопия. 1984. № 10. С. 88-91.

25. Герасименко Ю. С., Білоусова Н. А., Васильєв Г. С., Васильєва С. М., Клименко А. В., Вишневська Ю.П. Розвиток електрохімічних методів вимірювання швидкості корозії металів наукової школи професора Л.І. Антропова. Наукові вісті НТУУ «КПІ» : науково-

технічний журнал. 2013. № 6(92). С. 89–102.

26. Wells N., Moon R.E., Alrafie E., Davis B. Moisture testing coating performance on metal materials. Department of Defence: Allied Nations Technical Corrosion Conference. 2019. Paper No 2019-0000.

27. Stepova O., Parashchiienko I., Lartseva I. Calculation of Steel Pipeline Corrosion Depth at the Galvanic Corrosive Element Operation. International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol.7, Issue 3.2, pp. 431-435.

28. Paolinelli L. D., Nesic S. Calculation of mass transfer coefficients for corrosion prediction in two-phase gas-liquid pipe flow. Conference: Eurocorr 2019-Lab: Institute for Corrosion and Multiphase Technology. Seville, Spain. 2019.

29. Клименко А.В. Створення наукових основ і технічних засобів дослідження, оцінки і прогнозування стрес-корозійного руйнування магістральних газопроводів: дис. канд. техн. наук: 05.17.14. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Київ. 2012.

30. Коваленко С. Ю., Рибаков А. О., Клименко А. В., Шитова Л. Г. Корозія внутрішньої стінки промислового газопроводу. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2012. Т.48. №2. С.97-102.

References

[1] T. Bobalo, Y. Blikharskyy, N. Kopiika, M. Volynets, “Serviceability of RC Beams Reinforced with High Strength Rebar’s and Steel Plate”, *Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol 47, pp. 25-33, 2019.

[2] O.P. Voskobiinyk, “Typolohichne porivniannia defektiv ta poshkodzhen zalizobetonnykh, metalevykh ta stalezalizobetonnykh balkovykh konstruktsii”, *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*, no. 662, pp. 97-103, 2010.

[3] O.P. Voskobiinyk, I.O. Parkhomenko, Ya.O Tomilin, “Osoblyvosti roboty trubobetonnykh stiiok iz koroziinymy poshkodzhenniamy stalevoi obolonky”, *Zbirnyk naukovykh prats Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu im. Yu. Kondratiuka. Ser. Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, no 1, pp. 93-98, 2011.

[4] K. Ouzaa, C. Oucif, “Numerical model for prediction of corrosion of steel reinforcements in reinforced concrete structures”, *Underground Space*, Vol. 4, Issue 1, pp. 72-77, 2019.

[5] P. Koteš, M. Strieška, M. Brodňan, J. Odrobiňák, J. Gocál, “Rapid tests of corrosion in corrosion chamber”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, https:///doi:10.1088/1757-899X/365/5/052013, 2018.

[6] M.I. Hredil, “Ekspres-metodyka otsiniuvannia vplyvu korozii armatury na tsilisnist zalizobetonu”, *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv (Physicochemical Mechanics of Materials)*, Vol. 3, pp. 102-104, 2013.

[7] K. Sadeghi, F. Nouban, “Damage and fatigue quantification of RC structures”, *Structural Engineering and Mechanics*, 58 (6), pp. 1021–1044, 2016.

[8] M.M. Lobodanov, P.I. Vehera, Z.Ya Blikharskyi, “Analiz vplyvu osnovnykh vydiv defektiv ta poshkodzhen na zalizobetonnu zdatnist zalizobetonnykh elementiv”, *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika», seriia «Teoriia i praktyka budivnytstva»*, № 888, pp. 93-100, 2018.

[9] C. Chien‑Kuo, S. Hsin‑Fang, C. Kai‑Ning, H. Fu‑Pei, “Experimental Quantification on the Residual Seismic Capacity of Damaged RC Column Members”, *Int J Concr Struct Mater*, Vol. 13 (17), https://doi.org/10.1186/s40069-019-0338-z, 2019.

[10] L. Kang Seok, “An Experimental Study on Hybrid Noncompression CF Bracing and GF Sheet Wrapping Reinforcement Method to Restore Damaged RC Structures”, *Hindawi Publishing Corporation-Shock and Vibration*, http://dx.doi.org/10.1155/2015/202751, 2015.

[11] R. V. Shmihel, “Doslidzhennia faktoriv skorochennia stroku ekspluatatsii zalizobetonnykh

tsylindrychnykh rezervuariv", *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*, Vyp. 29, pp. 512-517, 2014.

[12] E. Sola, J. Ožbolt, G. Balabanic, "Modelling Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete: Natural vs. Accelerated Corrosion", *Conference Paper: 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. https://doi.org/10.21012/FC9.097, 2016.

[13] J. Ožbolt, G. Balabanić, F. Oršanić, "Modelling corrosion of steel reinforcement in concrete", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 615, https://doi:10.1088/1757-899X/615/1/012011, 2019.

[14] Y. Shi, Y. Liu, X. Wang, Y. Zhou, J. Ma, Sh. Zhang, "Corrosion Study on Ni-based Alloy in Acidic Environment", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 611, https:///doi:10.1088/1757-899X/611/1/012008, 2019.

[15] M. Sroka, E. Jonda, M. Węglowski, S. Błacha, "The Corrosion Studies of Electron Beam Welded Nickel Alloy", *Matec Web of Conferences*, Vol. 253. https://doi.org/10.1051/matecconf/201925303005, 2019.

[16] P.M. Jebaraj, M. Srinivasan, "General and Intergranular Corrosion of Austenitic Stainless Steel Castings", *Corrosion -Houston Tx.*, Vol. 45, Issue 11, pp. 938-942, 1989.

[17] A. Jagtap, C. Nayak, "Corrosion Monitoring of RCC Structure by Using Corrosion Expansion Sensor", *Springer Nature Switzerland AG*, Vol. 20, pp. 205-216, 2020.

[18] A. Cinitha, V. Sampath, K. Kesavan, "Strain monitoring of low carbon steel in a corrosive environment using fiber Bragg technology", *Construction and Building Materials*, Vol. 217, Issue 30, pp. 265-272, 2019.

[19] N. Jadhav, V. J. Gelling, "Review: The Use of Localized Electrochemical Techniques for Corrosion Studies", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 166, Issue 11, pp. 3461-3476, 2019.

[20] J. Ryl, J. Wysocka, St. Krakowiak, "Examples of XPS analysis in corrosion studies", *Gdansk University of Technology Conference Paper- Faculty of Chemistry-Escalab 250Xi in GUT*, 2017.

[21] P.M. Stashuk, "Doslidzhennia akustychnoi emisii pid chas elektrokhimichnoi korozii armatury zalizobetonnykh konstruktsii", *Dorohy i mosty*, Kyiv, Vol. 8, pp. 246-253, 2008.

[22] H.B. Muravyn, Yu.M. Palei, N.O. Makarova, Y.H. Levytyna, "Razrabotka akustyko – эmyssyonnoho metoda ydentyfykatsyy korrozyy", *Defektoskopyia*, no. 1, pp. 58-65, 1991.

[23] H.B. Muravyn, L.M. Lezvynskaia, N.O. Makarova, H.S. Pavlovskaia, "Zadachy akustyko – эmyssyonnoi dyahnostyky protsessa korrozyy", *Defektoskopyia*, no. 2, pp. 18-28, 1990.

[24] H.B. Muravyn, V.M. Fynkel, L.M. Lezvynskaia, Ya.V. Symkyn, "Yssledovanye deformyrovanyia kremnystoho zheleza metodom akustycheskoi emyssyy", *Defektoskopyia*, no. 10, pp. 88-91, 1984.

[25] Yu. S. Herasymenko, N. A. Bilousova, H. S. Vasyliev, S. M. Vasylieva, A. V. Klymenko, Yu. P. Vyshnevska, "Rozvytok elektrokhimichnykh metodiv vymiriuvannia shvydkosti korozii metaliv naukovoi shkoly profesora L.I. Antropova", *Naukovi visti NTUU «KPI»: naukovo-tekhnichnyi zhurnal*, no. 6(92), pp. 89–102, 2013.

[26] N. Wells, R.E. Moon, E. Alrafie, B. Davis, "Moisture testing coating performance on metal materials", *Department of Defence: Allied Nations Technical Corrosion Conference*, Paper No 2019-0000, 2019.

[27] O. Stepova, I. Parashchiienko, I. Lartseva, "Calculation of Steel Pipeline Corrosion Depth at the Galvanic Corrosive Element Operation", *International Journal of Engineering & Technology*, Vol.7, Issue 3.2, pp. 431-435, 2018.

[28] L. D. Paolinelli, S. Nesic, "Calculation of mass transfer coefficients for corrosion prediction in two-phase gas-liquid pipe flow", *Conference: Eurocorr 2019-Lab: Institute for Corrosion and Multiphase Technology*, Seville, Spain, 2019.

[29] A.V. Klymenko, "Stvorennia naukovykh osnov i tekhnichnykh zasobiv doslidzhennia,

otsinky i prohnozuvannia stres-koroziinoho ruinuvannia mahistralnykh hazoprovodiv. Rukopys", dis. cand. tekhn. nauk: 05.17.14. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut». Kyiv. 2012.

[30] S. Yu. Kovalenko, A. O. Rybakov, A. V. Klymenko, L. H. Shytova, "Koroziia vnutrishnoi stinky promyslovoho hazoprovodu", *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, T.48. no. 2, pp. 97-102, 2012.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИИ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Блихарский Я.З., к.т.н., ассистент,
Yaroslav.Z.Blikharskyy@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-3374-9195
Копийка Н.С., студент,
kopijka.nadija.1999@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2270-4028
Национальный университет «Львовская политехника»

Аннотация. В статье проведен детальный обзор и анализ имеющихся научных работ, экспериментальных исследований, направленных на решение проблемы мониторинга, моделирования, прогнозирования коррозионных процессов в железобетонных элементах.

Целью в работе поставлено провести сравнительный анализ имеющихся теорий и методик оценки кинетики коррозионных процессов в стальной арматуре, идентифицировать их преимущества и недостатки, дать рекомендации по совершенствованию.

В роботе проведен детальный анализ литературы для грунтовной систематизации и классификации научно-исследовательских разработок. Сделано вывод о наличии значительных препятствий, мешающих четкой формулировке теоретического тождества для идентификации коррозионного процесса. Определено, что в дальнейших исследованиях в этой области следует проводить более точную дифференциацию в связи с различными химическими, физическими, микро- и макроструктурными свойствами материала в каждом конкретном случае. Также следует учитывать различия в характеристиках агрессивной среды, а также в напряженно-деформированном состоянии элемента. В работе приведен дополнительный анализ существующих методик расчета и возможностей их использования для практических задач. Основные недостатки, которые были выявлены, включают в себя отсутствие конкретной общепринятой теоретической конструкции для разработки численной модели, различия в экспериментальных методологиях и недостаточное внимание к химическим и микроструктурным особенностям материала. Кроме того, при мониторинге и измерении скорости коррозии важно учитывать особенности агрессивной среды, которая воздействует на элемент в конкретных условиях эксплуатации.

В заключение в работе определены основные перспективные направления дальнейших исследований в проанализированной сфере, возможные способы решения приведенной проблемы. Сделан вывод о том, что дальнейшее развитие в этой области настоятельно рекомендуется, поскольку разработка четкой и надежной методики расчета для моделирования процессов коррозии может стать основой для дальнейшего его использования на практике, и сформирует предпосылки для оптимизации использования материальных и технических ресурсов.

Ключевые слова: коррозия, железобетонные конструкции, моделирование, скорость коррозии, методы исследований.

RESEARCH OF MONITORING AND MODELLING METHODS OF CORROSION PROCESSES IN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Blikharskyy Ya.Z., PhD, Assistant Professor,
Yaroslav.Z.Blikharskyy@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-3374-9195
Kopiika N.S., student,
kopijka.nadija. 1999@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2270-4028
Lviv Polytechnic National University

Abstract. The article provides a detailed review and analysis of existing scientific works and experimental studies aimed at solving the problem of monitoring, modeling, prediction of corrosion processes in reinforced concrete elements.

The main purpose of this work is to carry out the comparative analysis of the available theories and methods for estimation of the kinetics of corrosion processes in steel reinforcement, to determine their advantages and disadvantages and to provide recommendations for improvement. In addition the systematization and classification of scientific works and their results have been conducted.

It is concluded that there are circumstantial obstacles which obstruct the clear theoretical statement formulation. It is admitted that in further research in this area more precise differentiation should be done due to different chemical, physical, micro- and macro-structural properties of the material in each particular case. Also differences in aggressive environment features, as well as the stress-strain state of the element should be considered. In the work the additional analysis is provided regarding the existing calculation methodologies and possibilities of their use for practical issues. The main disadvantages, which were determined, include the lack of systematical theoretical structure for numerical model development, differences in experimental methodologies and insufficient attention to chemical and microstructural features of the material. In addition, during the monitoring and measurement of the corrosion rate it is important to take into consideration specifics of the aggressive environment, which affects the element in the particular operation conditions.

Therefore in this work main perspective directions for further research were determined and recommendations for methodologies` development were given. It is concluded that further development in this area is strongly recommended because formulation of clear and reliable calculation technique for corrosion processes modelling could become the basis for great amount of practical applications and corresponding optimisation in material and technical resources usage.

Keywords: corrosion, reinforced concrete structures, modeling, corrosion rate, research methods.

Стаття надійшла 7.12.2019