УДК 620.193.2:194.2

РОЗТРІСКУВАННЯ БЕТОННОЇ МАТРИЦІ ВІД ТИСКУ ПРОДУКТІВ КОРОЗІЇ АРМАТУРИ В ЗАЛІЗОБЕТОНІ

В. А. КОСТІН¹, Д. В. ЛАУХІН², Л. І. НИРКОВА¹

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ; ² НТУ "Дніпровська політехніка" МОН України

Вивчено окиснення металевої арматури в залізобетонних конструкціях після тривалої експлуатації методами математичного моделювання. У розрахунках використано бетон марки B25 (M350), з якого виготовляють монолітні фундаменти, плити перекриття, колони, балки, монолітні стіни тощо. Виявлено, що корозія обумовлена відновленням кисню із формуванням оксидного шару, що викликає корозію сталевої арматури у бетоні, його розширення та подальше поступове руйнування, що враховано за допомогою скалярної моделі ушкодження. Встановлено вплив товщини оксидного шару на тиск, нормальні та дотичні напруження на межі арматура-бетон. Визначено умови, за яких критичне корозійне руйнування арматури у бетонної конструкції не досягається. Ступінь пошкодження конструкції знижується зі збільшенням діаметра арматури, зменшенням товщини оксидного шару та загального вмісту в ній кисню.

Ключові слова: корозія, залізобетон, руйнування, моделювання, лінійно-пружний матеріал, оксидний шар, діаграма ушкодження.

The processes of oxidation of metal fittings in reinforced concrete structures after a long period of operation were studied using mathematical modeling methods. B25 (M350) concrete is used in the calculations, which is widely used for the manufacture of monolithic foundations, floor slabs, columns, beams, monolithic walls and other responsible structures. It is found that the corrosion process is caused by the recovery of oxygen with the formation of an oxide layer, which causes gradual fracture of concrete, which is taken into account using a scalar damage model. The effect of the thickness of the oxide layer on the pressure, normal and tangential stresses at the reinforcement–concrete boundary is determined. The conditions under which the critical state of corrosion fracture of the concrete structure cannot be reached have been determined. It is established that the degree of damage to the structure decreases with an increase in the diameter of the reinforcement, a decrease in the thickness of the oxide layer and the total oxygen content in the concrete structure.

Keywords: *corrosion, reinforced concrete, fracture, modeling, linear elastic material, oxide layer, damage diagram.*

Вступ. Залізобетонні конструкції – основні елементи сучасних будівель та споруд. Їх застосовують у багатьох галузях будівництва через економічність проти конструкцій з інших матеріалів. Зокрема, у будівництві мостів, гідротехнічних споруд, теплових електростанцій, аеродромів, доріг, опор і стовпів для ліній електропередачі. Для спорудження житлових та громадських будівель все частіше використовують залізобетонні елементи заводського виготовлення, у тому числі великопанельні. Ці конструкції – основа довгострокових оборонних споруд [1, 2].

Бетон слабо витримує навантаження на вигин та розтяг, тому армування сталевими прутами надає конструкції вищої міцності, надійності, здатності витриму-

Контактна особа: В. А. КОСТІН, e-mail: valerykkos@gmail.com

вати значні статичні та динамічні навантаження. [3]. Водночас через взаємодію з вологим зовнішнім середовищем залізобетонні конструкції швидко руйнуються внаслідок корозії [4, 5]. Іржа утворюється під час взаємодії кисню з залізом, найчастіше – у присутності води. Виникнення іржі також пришвидшують температура, коефіцієнт заміщення, умови роботи, якість захисту поверхні, морська вода тощо. Окиснення найчастіше супроводжується збільшенням об'єму кородованого металу. Внаслідок цього створюються потужні внутрішні напруження, що розтягують його, викликаючи деформацію або навіть руйнування.

Зрозуміло, що питання, які пов'язані з підвищенням опору корозійному руйнуванню залізобетонних конструкцій, мають важливе практичне значення за використання високоміцної холоднодеформованої арматури у будівництві [6]. Тут слід враховувати, що неметалеві включення у сталі – додаткове джерело передчасного корозійного руйнування високоміцного прокату [7], які до того ж суттєво впливають на технологічність його виробництва [8, 9] проти традиційного арматурного.

Оскільки безпосередньо контролювати руйнування залізобетонної конструкції досить складно, використали методи комп'ютерного моделювання для визначення основних чинників, що впливають на її корозійну тривкість під час окиснення сталевих стрижнів, якими армують бетон.

Матеріал та методика. Для комп'ютерного моделювання в розрахунках використали властивості бетону марки B25 (M350), з якого виготовляють монолітні фундаменти, пальові залізобетонні конструкції, плити перекриття, колони, ригелі, балки, монолітні стіни тощо. З конструкційного бетону марки M-350 виробляють плити для злітно-посадкових смуг, що здатні витримувати екстремальні навантаження за повної відсутності дефектів на їх поверхні (тріщин, розшарувань, каверн). Ця марка найпопулярніша у комерційному будівництві, зокрема, під час виробництва залізобетонних виробів. У нормативних документах вказують саме клас міцності бетону: зокрема, бетон B15 витримує тиск до 15 MPa, а B25 – до 25 MPa.

Як арматуру обрали сталь A500C діаметром від 12 mm з низьким вмістом вуглецю. Цей вид прокату виробляють згідно з вимогами ГОСТ 52544 2006. Матеріал під час вальцювання термомеханічно обробляють, забезпечуючи сталі задовільну пластичність та поліпшену зварюваність. Механічні властивості арматурних сталей для моделювання наведено у таблиці.

Границя міцності, МРа	600
Границя течіння, МРа	500
Відносне видовження δ_5 , %	14
Кут загину за діаметра <i>C</i> = 3 <i>d</i>	180°
Розрахунковий опір розтягуванню R_S за \varnothing 68 mm, MPa	450
Розрахунковий опір розтягуванню R_S за \varnothing 1040 mm, MPa	450
Розрахунковий опір стиску <i>R_{SC}</i> , MPa	450
Використання за негативних температур	До -55°С
Використання дугового зварювання	Дозволено

Механічні властивості сталі А500С для моделювання [10]

Корозійне руйнування залізобетонної конструкції моделювали, використовуючи пакет COMSOL Multiphysics [11]. Для цього використовували модулі "Нелінійні матеріали", "Механіка конструкцій", "Електрохімічні акумулятори", "Корозія", "Електрохімія". Припускали, що корозія обумовлена відновленням кисню з формуванням оксидного шару. Перенесення заряду електролітом моделювали в конкретній області, де електропровідність електроліту та коефіцієнт дифузії кисню залежать від вмісту вологи. Арматуру та бетон вважали лінійними еластичними матеріалами, де об'ємна деформація арматури на кожному тимчасовому етапі залежить від товщини оксидного шару. Розтріскування бетону через об'ємне розширення внаслідок формування оксидного шару враховували за допомогою скалярної моделі ушкодження [12].



Рис. 1. Загальний вигляд бетонних плит (*a*), геометрія моделі (*b*) та область побудови розрахункової сітки (*c*).

Fig. 1. A general view of concrete slabs (*a*), model geometry (*b*) and computational mesh area (*c*).

У моделі прийняли (рис. 1), що кисень дифундує з одного боку бетонного блока, водонасиченість пор якого, як і передбачали, становить 60%. Використовували інтерфейс Tertary Current Distribution на основі рівняння Нернста–Планка для фазового потенціалу електроліту і концентрації кисню, враховуючи модель збереження заряду електроліту. Концентрацію кисню на лівій межі встановлювали рівною еталонному значенню 8,6 mol/m³.

Товщину оксидного шару заліза вздовж межі поділу арматура-бетон вираховували за допомогою функції Dissolving-Depositing Species вузла Electrode Surface. За скалярною моделлю ушкоджень Damage описували розтріскування конкретної ділянки під вузлом. Середню поверхневу деформацію арматурного стрижня розраховували, беручи до уваги товщину оксидного шару, отриманого за третинного розподілу струму в інтерфейсі Нернста-Планка. Враховували, що початкова деформація металевих стрижнів у бетонній конструкції, яку визначали за допомого вузла Initial Strain, становить 0,5%. Моделювали за допомогою нестаціонарного за часом вирішувача COMSOL (MUMPS), який розраховував наростання товщини оксидного шару впродовж 1500 днів.

Результати та їх обговорення. На першому етапі зародження корозійного шару та його ріст досліджували на моделі, що складалась лише з одного стрижня арматури. Це дало можливість відпрацювати розрахункову методику та визначити оптимальні параметри моделі.

Вихідні її параметри обрали згідно з рекомендаціями, наведеними раніше [13]. Прийняли значення коефіцієнта Тафеля для заліза рівним 0,41 V, для водню 0,15 V, для кисню 0,18 V; рівноважний вміст кисню в бетоні 8,6 mol/m³; рівноважний потенціал окиснення заліза –0,76 V, виділення водню –1,03 V і відновлення кисню 0,189 V; густина струму обміну окиснення заліза 7,1·10⁻⁵ A/m², виділення водню 1,1·10⁻² A/m² і обміну кисню 7,7·10⁻⁷ A/m². Виявили (рис. 2), що зі

збільшенням товщини оксидного шару тиск і напруження за Мізесом зростають, тоді як нормальні знижуються.



Упродовж 900–1000 днів тиск починає різко падати, що, можливо, викликано появою тріщини на межі шару та її подальшим розповсюдженням вглиб бетону. Дослідженнями за допомогою програмного модуля Damage виявили, що корозія арматури призводить до руйнування бетону (розтріскування). Під параметром Damage розуміємо такий стан модельної конструкції, що може змінюватися в діапазоні [0, 1] і відповідає станам "0" (пошкодження відсутнє), "1" (повне руйнування). З розвитком корозії він поступово збільшується (рис. 3).



Рис. 3. Розтріскування бетону внаслідок корозії арматури після 1500 днів: *а* – діаграма пошкодження (Damage = 0,8); *b* – діаграма нелокальної еквівалентної деформації.



Встановили, що тріщина зароджується на межі арматурного стрижня та бетону, оскільки жорсткість останнього погіршується і він вже не здатен опиратись її поширенню. Зіставлення діаграм пошкодження та нелокальної еквівалентної деформації свідчить про можливі напрямки розтріскування (зіркоподібні світлі ділянки на рис. 3). Але реалізується той, де нелокальна еквівалентна деформація найбільша (1,6·10⁻³). Аналіз траєкторії поширення тріщини засвідчив, що вона "прагне" якнайшвидше досягти найближчої зовнішньої поверхні бетонної плити.

На другому етапі досліджень окиснення арматурних стрижнів у бетоні вивчали з допомогою повномасштабної моделі (див. рис. 1*c*). Встановили, що основні закономірності його розтріскування внаслідок корозії арматури зберігаються і тут, але кількість елементів розрахункової сітки різко зростає (з ~ 3000 до ~ 17000), через що відчутно збільшується час розрахунку (до 4...5 h) і ресурси оперативної пам'яті ПК (до 5 Gb).

Основні відмінності цих двох етапів проявляються у характері розподілу дифузійних струмів кисню в бетоні, який необхідний для формування оксидного шару навколо металевої арматури (рис. 4). Під час моделювання реальної конструкції його розподіл тут рівномірніший та нижчі градієнти вмісту. Це, можливо, пов'язано з тим, що поширення дифузійних струмів (лінії на рис. 4) утруднене у виробах та не завжди вони безпосередньо прямують до металевої арматури.



Рис. 4. Розподіл вмісту кисню в бетоні після 1500 днів корозії: *a* – спрощена модель; *b* – повномасштабна (лінії – дифузійні струми): *I* – бетон; *2* – арматура.

Fig. 4. Distribution of oxygen content in concrete after 1500 days of corrosion: a - simple model; b - full-scale model (lines - diffusion flows): 1 - concrete; 2 - reinforcement.

З розвитком корозії у залізобетонній конструкції накопичуються пошкодження і цей процес тристадійний (рис. 5). На першій стадії (інкубаційний період, параметр Damage = 0) пошкоджуваність відсутня. Тут починає збільшуватися товщина оксидного шару, підвищуються напруження на межі бетон–арматура, але їх рівень недостатній для початку руйнування бетону. Тривалість цієї стадії залежить від розміру арматури. Зокрема, для арматури діаметром 6 mm інкубаційний період триває 100 днів, для 10 mm – 175 днів, для 12 mm – 225 днів, для 16 mm – 300 днів.



Fig. 5. The influence of corrosion time on the development of concrete structure damage depending on the diameter of the reinforcement (1 - 6 mm; 2 - 10; 3 - 12; 4 - 16 mm) and concrete strength (a - 10 MPa; b - 15; c - 25).

Друга стадія (сталого росту оксидного шару, параметр Damage < 0,7...0,8) триває від 150 (діаметр арматури 6 mm) до 430 днів (діаметр арматури 16 mm).

Швидкість пошкоджуваності тут у день становить: 0,0035 1/days (діаметр 6 mm), 0,0017 1/days (10 mm), 0,0013 1/days (12 mm) та 0,0011 1/days (16 mm).

Кінцева третя стадія ("повільного" передруйнування, параметр Damage > 0,8) – це основний час роботи конструкції, яка триває 3–5 років до появи ознак розтріскування бетону внаслідок корозії арматури на поверхні конструкції. Перехід від другої до третьої стадії, можливо, пов'язаний з гальмуванням росту оксидного шару внаслідок дії стискальних напружень на межі оксидний шар-бетон.

Під час моделювання аналізували вплив вихідної міцності бетону за розтягу на схильність залізобетонних конструкцій до руйнування. Встановили, що за міцності 10 MPa (рис. 5*a*) у всіх досліджуваних типорозмірах арматури (діаметр 6; 10; 12 та 16 mm) з досягненням 1500 днів у ньому починають формуватися тріщини: параметр Damage змінюється від 0,8 до 0,95. Збільшуючи міцність бетону до 15 MPa (рис. 5*b*), можна відчутно знизити схильність залізобетонної конструкції до руйнування внаслідок окиснення арматури діаметром 12 mm до значення Damage = 0,6, а для арматури діаметром 16 mm – навіть до 0,55. З подальшим ростом міцності бетону до 25 MPa (рис. 5*c*) зростає опір розтріскуванню, а його арматура діаметром 16 mm взагалі не розтріскується (Damage = 0).

Серед чинників, що визначально впливають на розвиток корозії та пошкоджень бетонної конструкції, – товщина оксидного шару, вміст кисню та рівень напружень на межі поділу бетон–арматура (рис. 6).



Рис. 6. Вплив параметрів арматури (*a*: *1* – діаметр; *2* – товщина оксидного шару; *3* – вміст кисню) та її розташування на параметр руйнування Damage (*b*: *1* – бетон; *2* – арматура).

Fig. 6. The influence of reinforcement parameters (*a*: 1 – diameter; 2 – thickness of the oxide layer; 3 – oxygen content) and its location on the fracture parameter Damage (*b*: 1 – concrete; 2 – reinforcement).

Отже, пошкоджуваність конструкцій поступово знижується зі збільшенням діаметра арматури, зменшенням товщини оксидного шару та загального вмісту кисню. Важливе значення має характер розташування арматури відносно вільних поверхонь (рис. 6b). Тому, щоб запобігти передчасному руйнуванню залізобетонних конструкцій через окиснення арматури, необхідно обирати бетон вищої міцності і використовувати арматуру більшого діаметра.

Верифікація запропонованої моделі засвідчила її достатній ступінь узгодженості з результатами натурних експериментів та даними про корозійне розтріскування залізобетонних плит (хвилерізів, пірсів) внаслідок дії агресивних середовищ [14, 15]. Водночас залізобетонні плити для злітно-посадкових смуг підвищеної міцності (використовують бетон марки M350 та M500 з границею міцності 35...45 МРа) здатні функціонувати без капітального ремонту до 25 років, що також узгоджується з отриманими результатами.

ВИСНОВКИ

Встановлено вплив товщини оксидного шару на тиск та напруження на межі поділу арматура-бетон, які з часом поступово зростають, та нормальні напруження, які знижуються. З досягненням часу експлуатації 900...1000 днів тиск на межі починає різко падати, що, можливо, пов'язано з утворенням мікротріщин та їх поширенням вглиб бетону. Виявлено, що руйнування є тристадійне: інкубаційний період, стадії "швидкого" накопичення пошкоджень та "повільного" передруйнування.

- 1. *Павліков А. М.* Залізобетонні конструкції: будівлі, споруди та їх частини: Підручник. Полтава: ПолтНТУ, 2017. 284 с.
- Клімов Ю. А., Крівсльов Л. І. Новітні технології створення залізобетонних конструкцій у транспортному будівництві // Зб. наук. праць Нац. авіаційн. ун-ту. – 2000. – № 1–2. – С. 221–225.
- Analytical study of tessellated structural-architectural reinforced concrete shear walls
 / M. Syed, M. Moeini, P. Okumus, N. Elhami-Khorasani, B. E. Ross, and M. C. Kleiss
 // Eng. Struct. 2021. № 244. 112768.
- Review on corrosion of steel reinforcement in alkali-activated concretes in chloride-containing environments / W. Tahri, Hu Xiang, C. Shi, and Z. Zhang // Construction and Building Mater. – 2021. – № 293. – 123484.
- Corrosion characteristics of vanadium micro-alloyed steel reinforcement bars exposed in concrete environments and industrially polluted atmosphere / R. R. Hussain, A. Al-Negheimish, A. Alhozaimy, and D. D. N. Singh // Cement and Concrete Composites. 2020. № 113. 103728.
- 6. *Elements* of technology for producing cold-formed rebar from C86D steel using an idle stand / I. Yu. Prikhod'ko, E. V. Parusov, O. V. Parusov, I. N. Chuiko, and E. S. Klemeshov // Steel in Translation. 2020. **50**, № 7. P. 481–486.
- Corrosive damage close to nonmetallic inclusions in bearing steels / S. I. Gubenko, A. B. Sychkov, E. V. Parusov, A. I. Denisenko, and A. N. Zavalishchin // Steel in Translation. – 2018. – 48, № 3. – P. 197–201.
- Evolution of the defect structure of pearlitic steel in cold deformation / E. V. Parusov, G. D. Sukhomlin, S. I. Gubenko, A. B. Sychkov, A. I. Denisenko, and G. Ya. Kamalova // Steel in Translation. – 2018. – 48, № 7. – P. 472–477.
- Structural evolution of thin-plate pearlite in wire-blank production / E. V. Parusov, S. I. Gubenko, A. B. Sychkov, I. N. Chuiko, L. V. Sagura, and G. Ya. Kamalova // Steel in Translation. 2019. 49, № 5. P. 350–356.
- 10. *A500C valves*: technical characteristics and differences from A-III valves. <u>https://www.stroymetall.ru/stati/osobennosti-armatury-a500s/</u>
- 11. Dickinson Edmund J. F., Ekström H., and Fontes Ed. COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis (mini-review) // Electrochemistry Communications. 2014. № 40. P. 71–74.
- 12. Grassl P. and Jirásek M. Damage-plastic model for concrete failure // Int. J. of Solids and Struct. 2006. **43**, № 22–23. P. 7166–7196.
- 13. Corrosion Module. Application Library Manual. https://doc.comsol.com/5.3/doc/com.comsol.help.corr/CorrosionApplicationLibraryManual.pdf
- 14. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Киссель. М.: Стройиздат, 1990. 316 с.
- 15. Леонович С. Н., Полонина Е. Н., Садовская Е. А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при комбинированном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии и их восстановление. – Минск: БНТУ, 2021. – 354 с.

Одержано 28.07.2022