

УДК 620.193:691.328

ВТРАТА КОГЕЗІЇ МІЖ БЕТОНОМ ТА СТАЛЕВОЮ АРМАТУРОЮ ЗА ВПЛИВУ КОРОЗИВНО-НАВОДНЮВАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

М. І. ГРЕДІЛЬ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Використано електрохімічний підхід до моделювання експлуатаційної деградації залізобетону: анодну поляризацію – для пришвидшення корозії арматури в бетоні і катодну – для її наводнювання. В обох випадках за тривалої поляризації виявлено погіршення зчеплення арматури з бетоном.

Ключові слова: залізобетон, корозія арматури, наводнювання, міцність зв'язку.

The electrochemical approach to simulation of the operational degradation of reinforced concrete is used: anodic polarization – to accelerate the reinforcement of corrosion in concrete and cathodic – for its hydrogenation. In both cases under durable polarization deterioration of cohesion between reinforcement and concrete is found.

Keywords: reinforced concrete, rebar corrosion, hydrogenation, bond strength.

Вступ. Залізобетонні (ЗБ) конструкції впродовж тривалої експлуатації зазнають сумісного впливу довкілля (циклічні перепади температури, кислотні дощі, солі-плавители) та експлуатаційних навантажень, що призводить до тріщиноутворення та втрати їх цілісності. Зниження міцності ЗБ елементів часто пов'язане з послабленням зв'язку між арматурою та бетоном, що можливо спричинено двома протилежними чинниками: корозією арматури та надмірним електрохімічним захистом ЗБ конструкції. Електрохімічний захист ЗБ конструкцій є загальноприйнятною практикою для запобігання корозії арматури, особливо, якщо об'єкт експлуатують у хлоридвмісному середовищі (наприклад, об'єкти морської інфраструктури). Проте прикладання катодного струму до арматури може призвести до утворення водню на поверхні сталі і його подальшої абсорбції металом. Роль водню в структурній цілісності ЗБ конструкцій зазвичай зводять до розгляду водневої крихкості арматури, що особливо актуально для високоміцних сталей [1–3], оскільки це може спричинити їх руйнування внаслідок водневого розтріскування під дією робочих напружень. Зважаючи на тривалий термін експлуатації ЗБ об'єктів, слід брати до уваги можливу деградацію властивостей матеріалів. Зокрема, виявили експлуатаційну деградацію арматурних прутків із гарячекатаної сталі [4, 5], яка проявилась у трансформації субструктури дислокацій та збільшенні їх густини, руйнуванні цементитних пластинок у перліті, формуванні включень другої фази на основі перехідних елементів у поверхневих шарах та утворенні мікротріщин, переважно вздовж меж зерен. При цьому міцність та пластичність арматурної сталі суттєво знизилась, а водень полегшив ці процеси [6]. Подібні ознаки деградації тривало експлуатованих сталей (особливо за впливу наводнювання із технологічних середовищ) є типовими для вуглецевих сталей трубопроводів різного призначення [7, 8] та теплотривких низьколегованих сталей парогонів ТЕС [9, 10]. Однак переважна більшість електрохімічно генерованого водню не проникає у метал, а рекомбінує і виділяється у вигляді газу на поверхні арматури, оточеної

Контактна особа: М. І. ГРЕДІЛЬ, e-mail: mysya.lviv@gmail.com

бетоном. Тому мета роботи – проаналізувати можливу руйнівну дію саме цього водню на міцність зв'язку на межі арматура–бетон, а також на сам бетон.

Методика експериментальних досліджень. Для досліджень виготовляли ЗБ зразки на портландцементі марки ПЦ П/А-К-400 (водоцементне співвідношення 0,5; співвідношення цемент/пісок 1/3; крупний наповнювач – гравій фракції 20 mm), використавши гладку арматуру класу А240С діаметром 12 mm. Бетонну суміш ущільнювали вібрацією впродовж 10 min. Зразок виймали з опалубки через 7 days після виготовлення, а досліджували не раніше, ніж через 28 days. Корозію арматури за лабораторних умов моделювали анодною поляризацією металу залізобетонного зразка з арматурним прутком по осі за розробленою раніше методикою [11]. Для оцінки впливу водню на зчеплення арматури з бетоном виготовляли циліндричні зразки з двома арматурними прутками різної довжини, які розміщували по осі циліндра і розділяли ізоляційною прокладкою. Один із прутків наводнювали, при цьому довший пруток зразка слугував катодом – його під'єднували до від'ємного полюса джерела живлення, а коротший ізолювали. Протиелектрод розміщували навколо ЗБ зразка. Схема установки для досліджень зображена на рис. 1. Накладали катодну поляризацію густиною струму $2,6 \text{ mA/cm}^2$ впродовж 7 days. Таким чином, наводнювався лише один із двох прутків у зразку (довший), тоді як інший не зазнавав суттєвого впливу – корозійна дія на нього робочого середовища несуттєва за обраної тривалості експерименту. Далі випробовували на зчеплення арматури з бетоном методом висмикування прутка за одновісного розтягу на розривній машині УМЕ-10Т зі сталою швидкістю переміщення балки $0,5 \text{ mm/min}$. Під час експерименту реєстрували діаграму навантаження–переміщення, з якої визначали максимальне зусилля відриву. Криві навантаження зразків наведені на рис. 2.

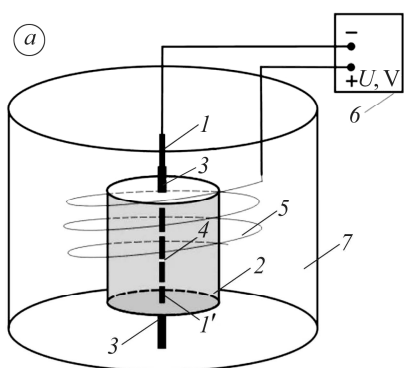


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Схема установки для електролітичного наводнювання ЗБ зразків:

1, 1' – сталеві прутки; 2 – бетон; 3 – захисне покриття; 4 – гумова прокладка;
5 – допоміжний електрод; 6 – джерело живлення; 7 – агресивне середовище (3% NaCl).

Fig. 1. A chart of electrochemical installation for reinforced concrete (RC) specimens hydrogenation:

1, 1' – steel rod; 2 – concrete; 3 – insulation coating; 4 – rubber gasket; 5 – auxiliary electrode;
6 – power supply; 7 – aggressive environment (3% NaCl).

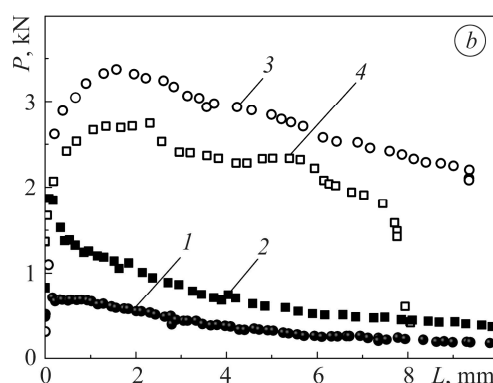


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Діаграми навантаження зразків за випроб на зчеплення арматури з бетоном:

1, 2 – наводнені зразки; 3, 4 – контрольні зразки з арматурними прутками
завдовжки 6 і 4 cm (1, 3) або 8 і 2 cm (2, 4).

Fig. 2. Load–displacement curves in pull-out tests for the reinforcement and concrete cohesion:

1, 2 – hydrogenated specimens; 3, 4 – control specimens with embedded rebar
lengths of 6 and 4 cm (1, 3) or 8 and 2 cm (2, 4).

Результати та їх обговорення. Методом пришвидшеної корозії показано, що тріщина у ЗБ зразку найраніше утворилася (рис. 3а) за найвищої прикладеної напруги (через 18 h), а найпізніше за найнижчої (через 864 h) [11], оскільки швидкість корозії пропорційна густині анодного струму, який у першому випадку є найвищим. Однак, розрахувавши кількість m розчиненого заліза у кожному випадку [12], встановили, що за найінтенсивнішої корозії потрібна найменша кількість корозійних продуктів для створення розклинювального тиску на межі арматура–бетон. Зазначають [13], що на ранній стадії корозії арматури у бетоні міцність зв'язку між ними дещо навіть зростає завдяки заповненню пор на межі бетон–арматура утвореними продуктами корозії. Зокрема, експериментально показано [14], що вплив корозії на міцність зв'язку незначний, коли корозійні втрати становлять <2,4%. Моделювання втрати міцності ЗБ зразків внаслідок корозії показало [15], що розвиток тріщин на поверхні бетону до ширини 1,6 mm супроводжується експоненціальним зниженням міцності зв'язку між бетоном та арматурою. Однак подальше накопичення на межі поділу сталь–бетон продуктів корозії, об'єм яких перевищує початковий об'єм заліза, створює внутрішні напруження, що спричиняє розтріскування та відколювання бетонного покриття. Ймовірно, за невеликої швидкості корозії макророзтріскуванню бетонної матриці передують субкритичний ріст тріщини від межі арматура–бетон до зовнішнього краю зразка, і корозійні продукти заповнюють також новоутворені тріщини (рис. 3а, б) та мігрують через пори у товщу бетону [16]. Очевидно, що для утворення макротріщини необхідний певний критичний тиск продуктів корозії, а здатність корозійних продуктів не лише заповнювати дефекти в околі межі арматура–бетон, а й проникати вглиб бетонної матриці, ускладнює оцінювання їх вкладу у формування напруженого стану ЗБ зразка. За реальних умов експлуатації швидкість корозії ар-

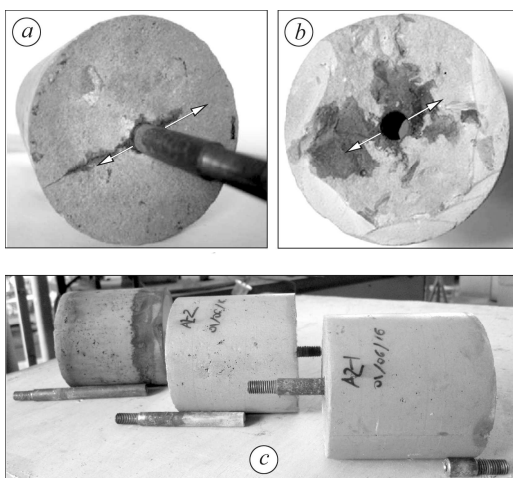


Рис. 3. Приклад випробуваних зразків: а, б – після пришвидшеної корозії (стрілками вказано напрям поширення тріщини); с – після випроб на міцність зв'язку (два зліва – наводнені; крайній справа – контрольний).

Fig. 3. An example of the tested specimens: а, b – after accelerated corrosion (arrows indicate the crack propagation direction); с – after tests for bond strength (the two left – hydrogenated; the right one – control).

матури мала, тому для аналізу впливу корозійних продуктів на міцність бетону методом пришвидшеної корозії слід прикладати якомога нижчу напругу.

За навантаження розтягом ЗБ зразка з двома арматурними прутками висмикується той, який потребує меншого зусилля. Під час випроб на зчеплення зразків, які не наводнювали (контрольна серія), зі зразка завжди витягувався короткий пруток, а зі зразків після катодної поляризації – саме наводнений пруток, незважаючи на те, що він довший (рис. 3с). Припустивши, що зчеплення арматури з бетоном однаково вздовж усієї межі контакту, можна розрахувати номінальну міцність зв'язку як відношення руйнівного навантаження до площі поверхні контакту відповідного прутка з бетоном (див. таблицю). Обчислена міцність зв'язку в межах кількох МПа, отримана для ненаводнених зразків, узгоджується з результатами інших дослідни-

ків [14], водночас для наводнених, незважаючи на суттєвий розкид даних, одержали значно нижчі значення. Таким чином, виявлено чіткий вплив катодної поляризації на міцність зв'язку в ЗБ зразках: навантаження, необхідне для витягання наводненого прутка, принаймні у 4 рази нижче, ніж для контрольного.

Міцність зв'язку арматури з бетоном за випроб ЗБ зразків на зчеплення

	Зразок			
	Контрольний		Наводнений	
Довжина арматурних прутків, см	8 / 2	6 / 4	8 / 2	6 / 4
Довжина висмикнутого прутка, см	2	4	8	6
Максимальне навантаження, kN	2,74	3,37	1,87	0,72
Номінальна міцність зв'язку, МПа	3,63	3,23	0,62	0,32

Слід зазначити, що прикладання зовнішнього катодного струму до ЗБ зразка спричиняє відтік хлорид-йонів від катода (арматури). На цьому ефекті ґрунтуються такі методи відновлення ЗБ, як підключення та електрохімічна екстракція хлоридів. Водночас йони Na^+ та K^+ мігрують у напрямі до арматури (рис. 4а).

Підвищена концентрація цих катіонів на межі сталь-бетон призводить до розм'якшення цементної компоненти бетону [17]. Ба більше, міцність зв'язку в ЗБ знижується пропорційно до вмісту натрію та калію в бетоні [18]. Відомо також, що під час катодної поляризації можливе наводнювання сталеві арматури, оскільки навіть за допустимих катодних струмів можуть з'являтися локальні ділянки надмірного захисту за нерівномірного розподілу захисних струмів внаслідок фізико-хімічної неоднорідності, властивої ЗБ матеріалу [17, 19]. Лише незначна частка водню проникає в метал [20], спричиняючи при цьому водневе окрихчення [21], основна ж його частина виділяється у вигляді газу на межі сталь-бетон, ймовірно, руйнуючи створеним тиском перетинки між мікропорами у цементному камені в

околі арматури, що призводить до тріщиноутворення, послаблення когезії на згаданій межі, а отже, до порушення цілісності композита. Таким чином, декогезія арматури від бетонної матриці за катодної поляризації можлива не лише через дифузійний перерозподіл йонів під впливом прикладеного струму, а й унаслідок виділення водню. Водневі бульбашки спостерігали під час електролітичного наводнювання у верхній частині ЗБ зразка на межі арматура-бетон, а також на його боковій поверхні, що наочно ілюструють шляхи виходу водню зі зразка (рис. 4b): від внутрішньої межі арматура-бетон вгору вздовж сталевих прутків та крізь шар бетону. Наразі немає одностайної думки чи дифузія водню у бетоні за згаданих умов є рівноважним процесом, чи, можливо, супроводжується створенням напружень, а отже, появою додаткових дефектів у бетонній матриці. Цей аспект потребує додаткових досліджень, оскільки може свідчити, що водень, виділений на ме-

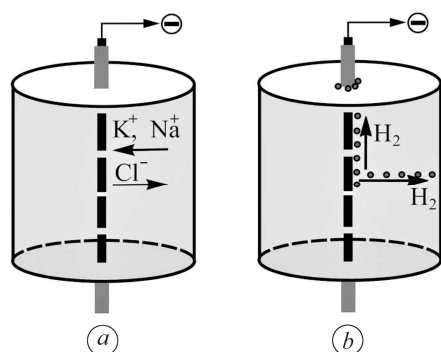


Рис. 4. Схема дифузії йонів у бетоні під час катодної поляризації ЗБ зразка (а) та шляхи виходу із нього водню (b).

Fig. 4. Scheme of ion diffusion in concrete during cathodic polarization of RC specimen (a) and ways for hydrogen release from the specimen (b).

жі арматура–бетон, може спричиняти деградацію не лише міцності зчеплення на цій межі, а й структури самого бетонного каменю.

ВИСНОВКИ

Корозія арматури в ЗБ зразку за прикладеної анодної поляризації призводить до розтріскування бетону і супроводжується заповненням дефектів у ньому продуктами корозії. Розподіл продуктів корозії в бетоні стримує зростаючий розклинювальний тиск, тому утворення макротріщини сповільнене, однак суттєвий відтік корозійних продуктів від межі поділу арматури з бетоном може послаблювати зв'язок між ними. Тривала катодна поляризація спричиняє деградацію зв'язку в ЗБ. Причиною зниження міцності на межі арматура–бетон може бути не лише електродифузія йонів у шарі бетону, але й виділення водню на поверхні арматури, що може окрихчувати сталь та створювати напруження в бетоні і, відповідно, сприяти утворенню тріщин як в арматурі, так і бетонній матриці.

1. *Toribio J. and Ovejero E.* Hydrogen assisted cracking in progressively drawn pearlitic steel // *Corr. Sci.* – 2007. – **49**, № 9. – P. 3539–3556.
2. *Hredil M. I. and Toribio J.* Susceptibility of prestressing steel wires to hydrogen-assisted cracking in alkaline media simulating concrete pore solutions // *Materials Science.* – 2017. – **52**, № 5. – P. 669–674.
(*Hredil M. I., Toribio J.* Susceptibility of prestressing steel wires to hydrogen-assisted cracking in alkaline media simulating concrete pore solutions // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2016. – **52**, № 5. – С. 61–65.)
3. *Hredil M. I., Toribio J., and Nykyforchyn H. M.* Analysis of the plasticity characteristics of progressively drawn pearlitic steel wires // *Materials Science.* – 2016. – **51**, № 4. – P. 514–519.
(*Hredil M. I., Toribio J., Nykyforchyn H. M.* Analysis of the plasticity characteristics of progressively drawn pearlitic steel wires // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 4. – С. 71–75.)
4. *Structure and hot-rolled reinforcement rods properties evolution in the process of long service life / V. R. Mikryukov, A. P. Syomin, S. V. Konovalov, Yu. F. Ivanov, and V. E. Gromov // Mat. Sci. and Eng.: A.* – 2006. – **430**, № 1–2. – P. 125–131.
5. *Оцінювання технічного стану арматури залізобетонного балкового прогону мосту кінця ХХ сторіччя / А. Р. Дзюбик, А. А. Войтович, О. З. Студент, Л. В. Дзюбик, І. Б. Хомич // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2021. – **57**, № 4. – С. 30–38.
6. *Nykyforchyn H. M. and Student O. Z.* Influence of hydrogen of the formation of fatigue thresholds in structural steels // *Materials Science.* – 2001. – **37**, № 2. – С. 252–263.
(*Никифорчин Г. М., Студент О. З.* Вплив водню на формування порогів втоми конструкційних сталей // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2001. – **37**, № 2. – С. 97–106.)
7. *Hredil M. I.* Role of disseminated damages in operational degradation of steels of the main gas conduits // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – **33** (Spec. Iss.). – P. 419–426.
8. *Fractographic signs of the in-service degradation of welded joints of oil mains / H. V. Krechkovs'ka, S. R. Yanovs'ky, O. Z. Student, H. M. Nykyforchyn // Materials Science.* – 2015. – **51**, № 2. – P. 165–171.
(*Фрактографічні ознаки експлуатаційної деградації зварних з'єднань магістральних нафтогонів / Г. В. Кречковська, С. Р. Яновський, О. З. Студент, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 2. – С. 21–27.)
9. *Influence of the long-term operation of 12Kh1MF steel of the bends of main steam pipelines of thermal power plants on its mechanical properties / O. Z. Student, H. V. Krechkovs'ka, T. E. Palashchuk, Ya. M. Hladkyi // Materials Science.* – 2018. – **53**, № 4. – P. 1–8.
(*Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ гинів головних парогонів ТЕС на її механічні властивості / О. З. Студент, Г. В. Кречковська, Т. Є. Палашук, Я. М. Гладкий // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2017. – **53**, № 4. – С. 34–41.)
10. *Student O. Z. and Krechkovs'ka H. V.* Anisotropy of the mechanical properties of degraded 15Kh1M1F steel after its operation in steam pipelines of thermal power plants // *Materials Science.* – 2012. – **47**, № 5. – P. 590–597.

- (Студент О. З., Кречковська Г. В. Анізотропія механічних властивостей деградованої сталі 15Х1М1Ф після її експлуатації на парогонях ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 5. – С. 19–26.)
11. Hredil M. I. Express method for the evaluation of the effect of corrosion of reinforcement on the integrity of reinforced concrete // *Materials Science*. – 2013. – **49**, № 3. – P. 94–397.
(Греділь М. І. Експрес-методика оцінювання впливу корозії арматури на цілісність залізобетону // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 3. – С. 102–104.)
 12. Hredil M. Peculiarities of bond strength degradation in reinforced concrete induced by accelerated electrochemical methods // *Procedia Structural Integrity*. – 2018. – **13**. – P. 1657–1662.
 13. Song H.-V. and Saraswathy V. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures – a review // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2007. – № 2. – P. 1–28.
 14. Ma Y. G., Zhongzhao Wang L., and Zhang J. Experimental investigation of corrosion effect on bond behavior between reinforcing bar and concrete // *Constr. Build. Mat.* – 2017. – **152**. – P. 240–249.
 15. Apostolopoulos Ch. A., Koulouris K. F., and Apostolopoulos A. Ch. Correlation of surface cracks of concrete due to corrosion and bond strength (between steel bar and concrete) // *Adv. Civ. Eng.* – 2019. – Article ID 3438743. (<https://doi.org/10.1155/2019/3438743>)
 16. On the penetration of corrosion products from reinforcing steel into concrete due to chloride-induced corrosion / H. S. Wong, Y. X. Zhao, A. R. Karimi, N. Buenfeld, and W. L. Jin // *Corr. Sci.* – 2010. – **52**, № 7. – P. 2469–2480.
 17. Chang J. J. A study of the bond degradation of rebar due to cathodic protection current // *Cem. Concr. Res.* – 2002. – **32**. – P. 657–663.
 18. Rasheeduzafar Ali M. G., and Al-Sulaimani G. J. Degradation of bond between reinforcing steel and concrete due to cathodic protection current // *ACI Mat. J.* – 1993. – **90**, № 1. – P. 8–15.
 19. Effect of cathodic protection on reinforced concrete with fly ash using electrochemical noise / J. García-Contreras, C. Gaona-Tiburcio, I. López-Cazares, G. Sánchez-Díaz, J. C. Ibarra Castillo, J. Jáquez-Muñoz, D. Nieves-Mendoza, E. Maldonado-Bandala, J. Olguín-Coca, L. D. López-León, and F. Almeraya-Calderón // *Materials*. – 2021. – **14**, № 9. – 2438. <https://doi.org/10.3390/ma14092438>.
 20. Capelle J., Dmytrakh I., and Pluvinage G. Comparative assessment of electrochemical hydrogen absorption by pipeline steels with different strength // *Corr. Sci.* – 2010. – **52**, № 5. – P. 1554–1559.
 21. Influence of the bulk concentration of hydrogen in the metal on the specific features of deformation of low-alloy pipe steel / I. M. Dmytrakh, R. L. Leshchak, A. M. Syrotyuk, and O. L. Lutyts'kyi // *Materials Science*. – 2014. – **50**, № 2. – P. 170–178.
(Вплив об'ємної концентрації водню в металі на особливості деформування низьколегованої трубопровідної сталі / І. М. Дмитрах, Р. Л. Лещак, А. М. Сиротюк, О. Л. Лутницький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 2. – С. 16–23.)

Одержано 14.05.2021