

**ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ПОШКОДЖЕНИХ КОРОЗІЄЮ  
FEATURES OF THE TENSE AND DEFORMED STATE OF  
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES DAMAGED BY CORROSION**

**Афанасьєва Л.В., к.т.н., доцент, <http://orcid.org/0000-0001-6237-2609>,  
Лаврінєнко Л.І., к.т.н., доцент, <http://orcid.org/0000-0001-5601-0943>  
(Київський національний університет будівництва і архітектури, м.Київ)**

**Afanasieva L., associate professor, <http://orcid.org/0000-0001-6237-2609>,  
Lavrinenko L., associate professor, <http://orcid.org/0000-0001-5601-0943> (Kyiv  
National University of Construction and Architecture, Kyiv )**

**Наведені результати досліджень впливу корозійних пошкоджень на роботу залізобетонних конструкцій, за результатами чисельних досліджень дана оцінка їх залишкового ресурсу міцності, а також можливості подальшої експлуатації.**

**Appraisal of safety of building constructions is one of the main tasks of their performance evaluation. During long-term operation period and permanently acting load together with corrosive medium constructions can sustain damage and failure. Of the most dangerous and widespread damage is construction corrosion. The consequence of the corrosion for reinforced concrete constructions can be the decrease of reinforcement cross and concrete section, distress in concrete under the pressure of corrosion products, decrease of the inner couple forces section arm, increase of the cramped zone height, danger of brickly concrete damage for bended elements. These factors negatively influence on solidity and strain characteristics of the structure and pose a threat to their safe operation. The article considers how dangerous different corrosion damage can be based on studies of different authors. The analysis of calculation results and experimental data is performed. Calculations of the cross bar of column models were performed using PC LIRA CAD to asses Appraisal of safety of building constructions is one of the main tasks of their the impact of corrosion damage on the stress-stain state of the joint collective columns, cross bar and the possibility of their further operation.**

**Ключові слова:**

**Корозія, пошкодження, корозія арматури, залізобетонний переріз, міцність  
Corrosion, damage, corrosion of the reinforcement, concrete section, strength..**

**Вступ.** Довготривала експлуатація залізобетонних конструкцій при тривалій дії навантаження та агресивних факторах середовища можуть викликати їх руйнування та пошкодження. Тому важливим аспектом визначення залишкової несучої здатності і відповідності вимогам подальшої експлуатації є дослідження впливу дефектів і пошкоджень на параметри напружено-деформованого стану залізобетонних елементів. Наслідком корозії для залізобетонних конструкцій можуть бути зменшення перерізів арматури та бетону, зниження щеплення арматури з бетоном, розтріскування бетону під дією тиску від продуктів корозії арматури, зменшення плеча внутрішньої пари сил перерізу, збільшення висоти стиснутої зони, загроза крихкого руйнування бетону для згинальних елементів. Зазначені фактори обумовлюють загрозу безпечної експлуатації конструкцій і будівель в цілому. Визначення впливу корозійного пошкодження на роботу будівельних конструкцій на підставі досліджень різних авторів [1,2,6], а також за результатами проведених чисельних досліджень і експериментальних даних дозволяє оцінити експлуатаційні якості конструкцій, їх відповідність вимогам нормативних документів.

**Аналіз останніх досліджень.** Результати попередніх досліджень [1,6] свідчать про відсутність єдиного підходу щодо аналітичного опису корозійних процесів в бетоні, арматурі та залізобетонних конструкціях, а також щодо їх впливу на напружено-деформований стан конструкції.

Встановлено [1], що найбільший вплив корозійних пошкоджень на міцність та деформативність залізобетонних конструкцій пов'язаний зі зменшенням поперечного перерізу стержнів робочої арматури.

Модель корозійного зносу арматурної сталі в залізобетонних конструкціях наведена на рис.1.

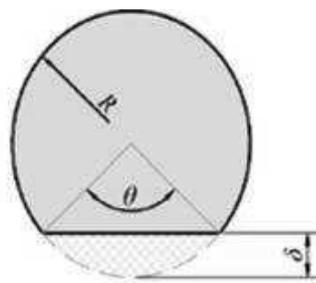


Рис.1. Модель корозійного зносу:

$R$  – радіус арматурного стержня;  $\delta$  –глибина шару, ушкодженого корозією

Зменшення площі перерізу арматури залежить від глибини ушкодженого шару бетону  $\delta$ , а також радіусу стержня  $R$ .

В цьому випадку втрачена площа перерізу арматурного стержня  $\Delta A_s^0$  визначається за формулою:

$$\Delta A_s^0 = R^2 \arccos \left( 1 - \frac{\delta}{R} \right) - (R - \delta) \sqrt{2R\delta - \delta^2} \quad (1)$$

Запропоновано визначати втрачену площу поперечного перерізу  $\Delta A_s$  залежності від класу арматури з урахуванням коефіцієнта  $\gamma_s$  за формулою:

$$\Delta A_s = \Delta A_s^0 \cdot \gamma_s, \quad (2)$$

де  $\gamma_s$  – коефіцієнт, що враховує клас арматури і приймається рівним: 1,0 – для арматури гладкого профілю; 1,2 – для арматури періодичного профілю. Через втрату площі арматурного стержня в розрахунковому перерізі відбувається зміщення центру його ваги. Зазначені зміни площі перерізу відповідають деформативності залізобетонних елементів з корозійними пошкодженнями. Глибина шару корозійних пошкоджень може бути визначена за формулою з урахуванням терміну  $t$  дії корозії:

$$\delta = \frac{k}{\sqrt{a}} \cdot t^n, \quad (3)$$

де  $k$  і  $n$  – емпіричні коефіцієнти,  $a$  – величина захисного шару, м.

Коефіцієнт  $k$  визначає вплив на поширення корозії таких факторів: концентрація агресивних компонентів, температурно-вологісний режим експлуатації елемента та дифузна проникність бетону. Коефіцієнт  $n$  враховує зміну швидкості корозії з часом, який приймають в діапазоні  $0 \leq n \leq 1$ .

Схеми поперечного перерізу залізобетонних елементів, ушкоджених корозією, наведені на рис. 2.

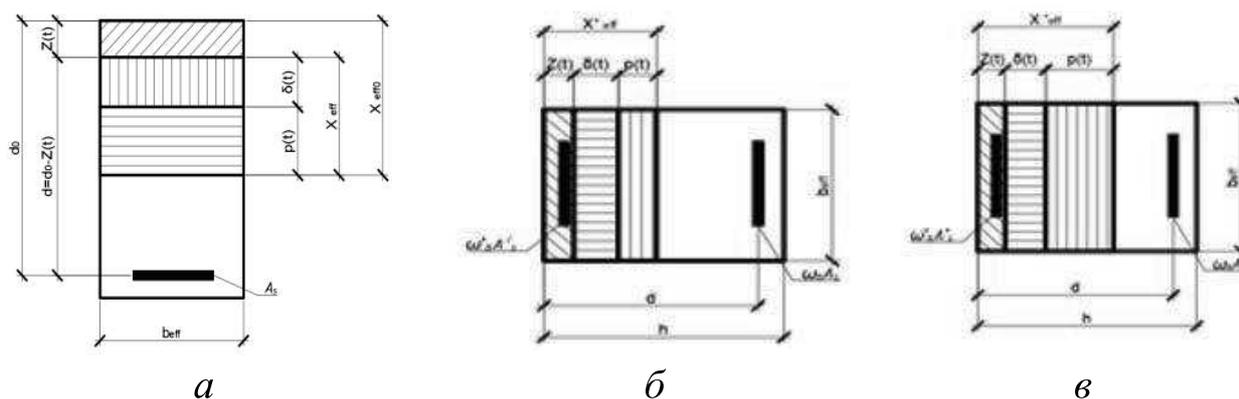


Рис. 2. Схеми поперечного перерізу елементів згинальних (а);  
позацентрово стиснутих (б, в)

Наведені схеми поперечного перерізу позацентрово стиснутих елементів відповідають випадку великих ексцентриситетів (рис. 2, б) і малих ексцентриситетів (рис. 2, в)

За результатами проведених досліджень [1] отримані діаграми « $\sigma$ - $\varepsilon$ » бетону з корозійними пошкодженнями. Встановлено, що для бетонів з корозійними пошкодженнями значення граничних деформацій, що відповідають призмовій міцності, в порівнянні з бетоном без пошкоджень менше на 18,0% – для бетонів з розрахунковою міцністю на стиск  $f_{cd} = 41$  МПа, а для бетонів з  $f_{cd} = 53,6$  МПа – на 11,8%. Слід зазначити, що при збільшенні початкового навантаження термін, після якого досягнута текучість арматури, різко зменшується. При навантаженні  $\leq 0,6 M_u$  руйнування відбувається по стиснутій зоні внаслідок зменшення розмірів ушкодженого поперечного перерізу. Це призводить до збільшення відсотка армування, переармуванню конструкції і небезпеки руйнування за другим випадком по стиснутій зоні.

Вище наведений аналіз досліджень свідчить, що значний вплив на якісні характеристики роботи залізобетонних елементів мають корозійні пошкодження бетонного перерізу та корозія стержнів робочої арматури.

**Постановка задач досліджень.** Натурні обстеження ушкоджених корозією елементів каркасу будівлі, які наведені на рис. 3, визначили необхідність оцінити їх залишкову міцність та експлуатаційну придатність. Для вирішення викладеної мети проведено аналіз можливості числового моделювання технічного стану елементів з пошкодженнями [3] та виконано чисельні дослідження з використанням обчислювального комплексу ЛПРА-САПР моделей збірних залізобетонних ригелей і колон, що мають корозійні пошкодження.



Рис.3. Натурні обстеження ушкоджених корозією конструкцій

**Результати досліджень.** При розрахунку прийняті передумови: корозія поширюється рівномірно по всьому периметру арматурного стержня, товщина корозійного шару становить 1,5 мм. Схеми поперечного перерізу дослідних моделей конструкції – ригелей і колон, що ушкоджені корозією, прийняті відповідно до рис. 2. За наявності корозійних пошкоджень бетонний переріз містить:  $z(t)$  – ділянка повністю зруйнованого корозією стиснутого бетону;  $\delta(t)$  – ділянка частково пошкодженого стиснутого бетону,  $p(t)$  – ділянка непошкодженої частини стиснутого бетону,  $X_{eff}$  – висота стиснутої зони,  $d$  – робоча висота перерізу,  $\omega_s$  та  $\omega'_s$  – коефіцієнти, що враховують зміну міцності опору пошкодженої корозією арматури (рис. 2).

Таким чином, комплексна оцінка глибини корозії арматурних стержнів (рис. 1), а також корозійне пошкодження бетонного перерізу (рис. 2) дає можливість визначити період надійної експлуатації конструкцій.

Наслідком корозійних впливів є деградація несучої здатності елементів конструкцій, що створює небезпеку їх руйнування. Серед цих впливів значне місце належить хімічній корозійній агресії, при якій пошкодження матеріалу починаються на поверхні його контакту із зовнішнім середовищем, просуваючись вглиб, після чого пошкодження зменшуються і обнуляються.

На рис. 4 наведені результати розрахунку моделей ригелей-близнюків – звичайної і ушкодженою корозією. Чисельні дослідження балок виконані на дію розрахункового навантаження на перекриття, що дорівнює  $5,8 \text{ кН/м}^2$ , з урахуванням корозії арматури в розтягнутій зоні та бетонного перерізу з глибиною корозії 1,5 мм (рис. 4). Порівняльний аналіз параметрів напружено-деформованого стану дослідних балок свідчить, що зменшення висоти стиснутої зони бетону становить до 10,0 %. В балках, ушкоджених корозією, розтягуючі зусилля в арматурі збільшилися до 60,0%.

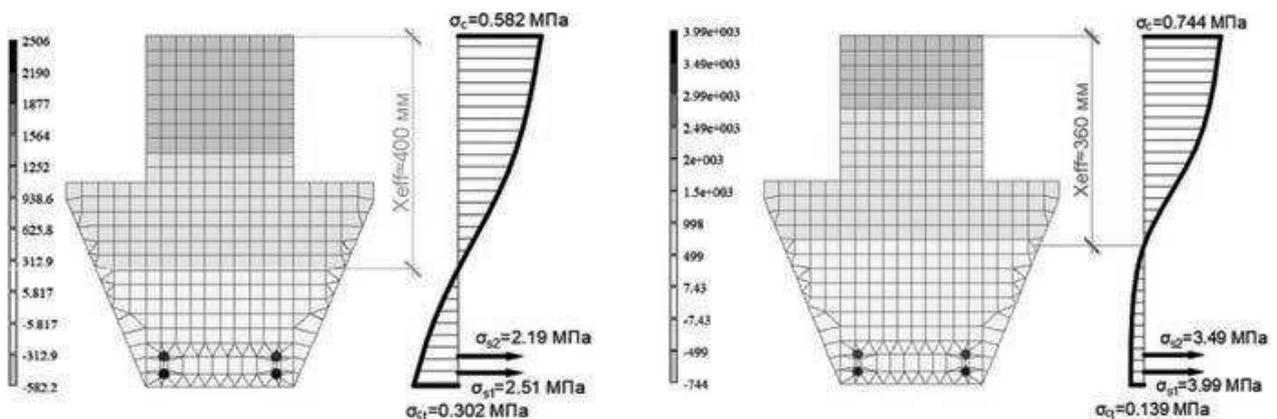


Рис. 4. Результати розрахунку дослідних ригелей: без пошкоджень (а); з пошкодженнями бетону та арматури (б)

Прогин балок з дефектом збільшився в 1,2 рази, при чому його величина не перевищує допустиме значення, що регламентоване вимогами ДБН [4]. Таким чином, комбінація різних дефектів і пошкоджень підвищує варіативність факторів, що впливають на залишкову несучу здатність згинальних залізобетонних елементів [5,6].

На рис. 5 наведені результати розрахунку моделей колон-близнюків – звичайної і ушкодженою корозією. За результатами збору навантажень чисельні дослідження колон виконані на дію рахункового навантаження: повздовжня сила  $N=500\text{кН}$ , згинальний момент  $M= 60\text{кНм}$

Корозійні пошкодження є причиною збільшення висоти стиснутої зони в дефектному перерізі. В даній розрахунковій ситуації вона збільшилась до 30,0%. Має місце перерозподіл напружень та зусиль, що сприймає елемент.

Напруження в стиснутій арматурі  $\sigma_s$ , збільшилось практично в два рази. Напруження в розтягнутій арматурі  $\sigma_{st}$  – до 30,0%. Такі зміни загрожують крихким руйнуванням стиснутого бетону та втратою міцності арматурного стержня через значну динаміку початкових та кінцевих значень параметрів перерізу (рис.2). Перекіс колони в площині рами збільшився до 20,0%.

Досвід експлуатації колон свідчить, що руйнівний вплив корозії має найбільші проявлення в місцях розташування зварних швів. Такий характер утворення дефектів конструкції необхідно враховувати при розробці її підсилення.

Виникнення мікро тріщиноутворення бетону збільшує величину непружних деформацій в бетоні, зменшується плече внутрішньої пари сил. Зазначені наслідки корозії підвищують деформативність конструкції, а також ексцентриситет прикладення зовнішнього зусилля.

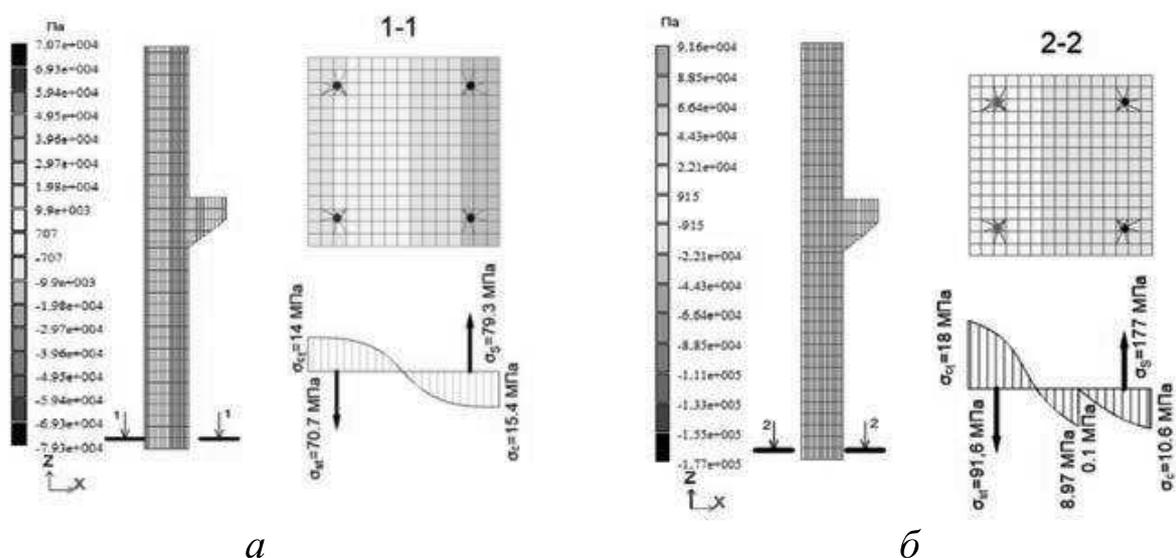


Рис.5. Результати розрахунку дослідних колон: без пошкоджень (а); з пошкодженнями бетону (б)

Результати розрахунків дослідних елементів каркасу – ригелей і колон наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків дослідних елементів каркасу

Показник	Ригель, корозійні пошкодження			Колона корозійні пошкодження		
	без пошкоджень	з пошкодженнями	зміна кінцевого параметру порівняно із початковим, %.	без пошкоджень	з пошкодженнями	зміна кінцевого параметру порівняно із початковим, %.
Напруження стиску бетону $\sigma_c$ , МПа	0,582	0,398	68,8	13,3	8,13	61
Напруження розтягу бетону. $\sigma_{ct}$ , МПа	0,302	0,391	22,8	11,8	14,5	23
Напруження стиску арматури $\sigma_s$ , МПаП	–	–	–	75,2	139	85
Напруження розтягу арматури $\sigma_{st}$ , МПа	251	182	27,4	68,5	80	17
Переміщення вдовж осі Z	0,152	0,188	23,7	-2,33	-2,7	16

Отримані параметри роботи колон, пошкоджених корозією, дозволили розробити підсилення натурних конструкцій обоймою з використанням кутиків і з'єднувальних планок

**Висновки та рекомендації.** За результатами виконаних натурних та чисельних досліджень ушкоджених корозією ригелей і колон встановлено, що корозійні пошкодження арматури та бетонного перерізу елемента суттєво

впливають на експлуатаційні якості конструкцій.. Розрахунок залишкової міцності дефектних конструкцій дозволяє оцінити корозійні процеси в бетоні та арматурі, визначити їх вплив на роботу конструкції, розробити підсилення елемента для придатності щодо подальшої експлуатації.

1. Афанасьєва Л.В., Добровінська М.В. Вплив корозійних пошкоджень на експлуатаційні якості залізобетонних конструкцій//Будівельні конструкції. Теорія і практика. – Київ, КНУБА. Вип.6 (2020) – С. 55–63. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.55-63>

Afanasieva L.V., Dobrovinska M.V. Vplyv koroziinykh poshkodzhen na eks-pluatatsiini yakosti zalizobetonnykh konstrukttsii//Budivelni konstrukttsii.– Kyiv, KNUBA, Vyp.6 (2020) – Pp. 55–63. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.55-63>

2. Лавріненко Л.І. Технічний стан сталевих конструкцій// Технічна експлуатація та реконструкція будівель.– Кам'янець-Подільський, Рута, 2018 – С. 282–359.

Lavrinenko L.I. Tekhnichni stan stalevykh konstrukttsii//Tekhnichna ekspluatatsiia ta rekonstrukttsiia budivel.– Kamianets-Podilskyi, Ruta, 2018 – Pp.282–359.

3. Бензель О.М., Лавріненко Л.І. Інформаційне моделювання сталевої будівлі з підвищеними вимогами жорсткості // Будівельні конструкції. Теорія і практика. Вип. 9 (2021)- с. 30-44. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44>

Benzel O.M., Lavrinenko L.I. Informatsiine modeliuвання stalevoi budivli z pidvyshchenomu vymohamy zhorstkosti // Budivelni konstrukttsii. Teoriia i praktyka. Vyp. 9 (2021)- s. 30-44. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44>

4. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. – Мінрегіонбуд України. Київ, 2011 – 71 с. – чинний з 01.06.2011

DBN V.2.6-98:2009. Konstrukttsii budynkiv ta sporud. Betonni ta zalizo-betonni konstrukttsii. Osnovni polozhennia proektuvannia. – Minrehionbud Ukrayiny. Kyiv, 2011 – 71 p. – chynnyi z 01.06.2011.

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

Blikharskyi Z.Ia., Lobodanov M.M., Vehera P.I. Analiz vplyvu osnovnykh vydiv defektiv ta poshkodzhen na nesuchu zdatnist zalizobetonnykh elementiv //Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Teoriia i praktyka budivnytstva, 2018, № 888 – Pp. 93–100.

6. Lemaye R.G., Angal R.D., Raclke A.S. Experimental studies on penetrating-type corrosion inhibitor in reinforced concret –The Indian concret Journal, N1, 2000 – Pp. 22-26.