

Вплив корозійних пошкоджень на експлуатаційні якості залізобетонних конструкцій

Людмила Афанасьєва¹, Марина Добровінська²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

¹afanasieva2709@gmail.com, orcid.org/0000-0001-6237-2609

²marynadobrovinska@ukr.net, orcid.org/0000-0002-0410-0362

DOI: 10.32347/2522-4182.6.2020.55-63

Анотація. Оцінка безпеки будівельних конструкцій є однією із основних задач оцінки їх експлуатаційних якостей. При довготривалому терміні експлуатації та при тривалій дії навантаження та агресивних факторів середовища конструкції можуть зазнавати руйнувань та пошкоджень.

Одним із найбільш небезпечних та поширених пошкоджень є корозія будівельних матеріалів. 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.

Ці фактори негативно впливають на міцнісні та деформативні характеристики конструкцій і становлять загрозу для їх безпечної експлуатації.

В статті розглянуто, наскільки небезпечними, можуть бути різні корозійні пошкодження на основі досліджень різних авторів. Виконано аналіз результатів розрахунків та експериментальних даних. Проведені чисельні дослідження моделей колон з використанням ПК ЛІРА САПР для оцінки впливу корозійного пошкодження на напружено-деформований стан стику збірних колон і можливості їх подальшої експлуатації.



Людмила Афанасьєва,
доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій
к.т.н., доц.



Марина Добровінська,
студент, магістр.

Ключові слова: корозія; корозійні пошкодження; корозія арматури; корозія залізобетонного перерізу.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Оцінка залишкового ресурсу конструкцій з корозійними пошкодженнями потребує знань про розвиток корозійних процесів в конструкції, а також прогнозування їх розвитку.

З цією метою проведені чисельні дослідження напружено-деформованого стану збірних залізобетонних колон будівлі, конструкції якої ушкоджені корозією.

Для оцінки експлуатаційних якостей залізобетонних конструкцій, що мають внутрішні дефекти, проведені експериментальні дослідження [1,2,3,4,5,7] потребують подальшого розвитку. Наведені чисельні дослідження дозволять розробити рекомендації щодо прогнозування придатності конструкцій до безпечної експлуатації.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

За результатами попередніх досліджень [1,2] встановлено, що найбільший вплив корозійних пошкоджень на міцність та деформативність залізобетонних конструкцій пов'язаний зі зменшенням поперечного перерізу стержнів робочої арматури.

Для реалізації математичної моделі в процесі чисельних досліджень враховані

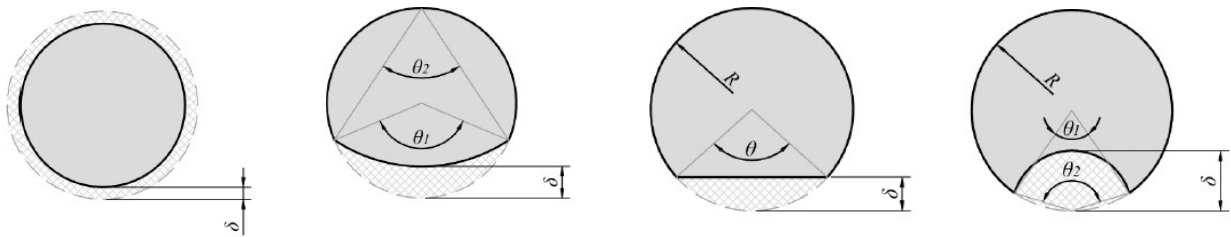


Рис.1. Моделі корозійного зносу арматурної сталі в залізобетонних конструкціях
Fig.1. Models of corrosion wear of reinforcing steel in reinforced concrete structures.

Дані досліджень [1,2] свідчать, що третя модель на рис.1 найбільше відповідає дослідним даним і є найбільш зручною у використанні, тому що визначення зменшеної площі перерізу арматури залежить від глибини ушкодженого шару бетону δ , а також радіусу стержня R .

В цьому випадку втрачена площа перерізу арматурного стержня ΔA_s^0 визначається за формулою:

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

На підставі досліджень [1] встановлено, що периметр арматури періодичного профілю більше круглого до 15,0%, а величина втраченої площі арматури серповидного профілю при однаковій глибині корозії для періодичного профілю перевищує ΔA_s^0 до 20,0%.

Таким чином, запропоновано визначати втрачену площу поперечного перерізу ΔA_s в залежності від класу арматури з урахуванням коефіцієнта γ_s за формулою:

наступні припущення для певного періоду часу: агресивність середовища по відношенню до арматури і дифузійна проникність бетону захисного шару залишаються незмінними; механічні характеристики арматурної сталі, а також щеплення арматури з бетоном приймають постійними.

Моделювання втрати площі перерізу арматури і накопичення продуктів корозії на підставі проведених досліджень [1] наведено на рис.1.

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

де

γ_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. За результатами експериментальних досліджень [1,6] для балок з робочою арматурою $\varnothing 6$ та $\varnothing 8$ мм, за умови втрати площі арматури відповідно до 5,0% та 20,0%, найбільше значення зменшення робочої висоти перерізу складає 0,82%; при пошкодженні до 20,0% більшого діаметра арматури зменшення граничного моменту становить до 0,9%. Такі значення є надзвичайно малими, тому при визначенні міцності перерізів елементів такими втратами можна знехтувати.

Зазначені зміни площі перерізу арматури можуть бути використані при визначенні оцінки напружено-деформованого стану

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 постійних параметрів: склад агресивного середовища, концентрація агресивних компонентів, температура вологі-

сний режим експлуатації елемента та дифузійна проникність бетону.

Коефіцієнт n враховує зміну швидкості корозії з часом, який варто приймати в діапазоні $0 < n < 1$.

На підставі проведених досліджень [1,2] значення коефіцієнтів в формулі (3) дорівнюють: $k=2.12$; $n=0.64$ для стержнів $\varnothing 8$ мм; $n=0.72$ для стержнів $\varnothing 6$ мм, за умови використання яких аналітична глибина корозії відрізняється від експериментальної величини в межах 5,0%.

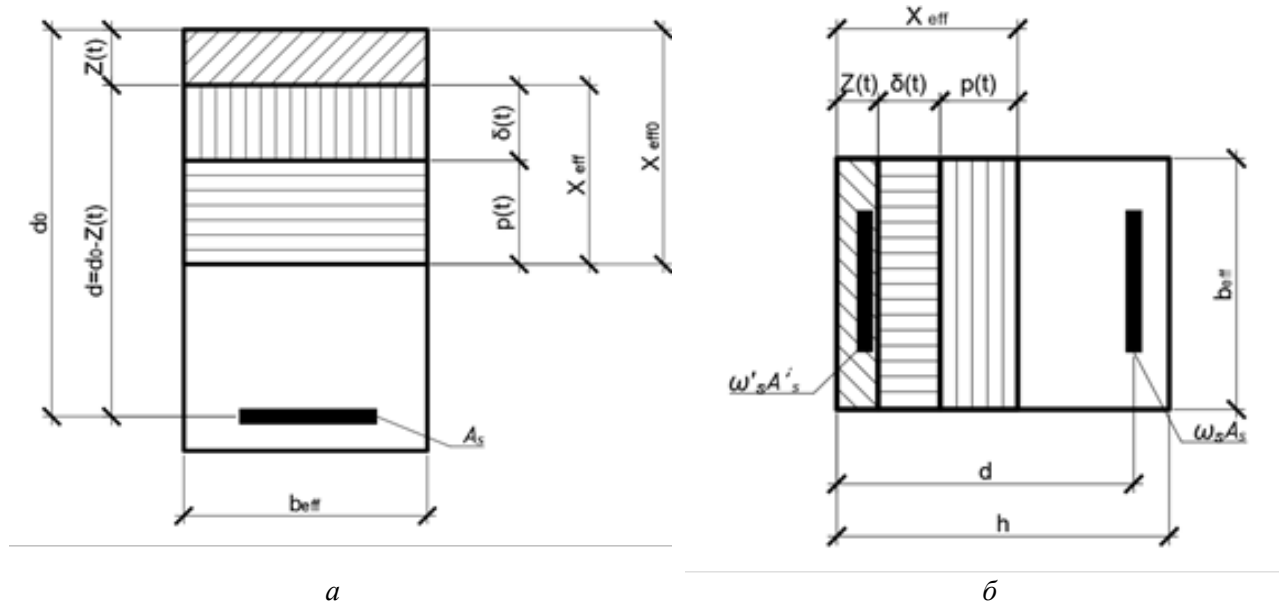


Рис.2. Схеми поперечного перерізу елемента:

а – схема перерізу згинального елемента; б – схема перерізу стиснутого елемента

Fig.2. Cross-sectional diagrams of the element:

а – cross-sectional diagram of the bending element; б – schematic diagram of the compressed element

за наявності корозійних пошкоджень бетонний переріз розглядають [1,2,4,6,7] як складений переріз (рис.2), де $Z(t)$ – 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, ω_s та ω'_s – коефіцієнти, що враховують зміну міцності опору пошкодженої корозією арматури.

Фізико-механічні характеристики шарів перерізу – відповідно напруження стиснутого бетону, міцність, модуль деформацій визначають з використанням залежностей В.М. Бондаренко [3,4,7]:

$$\sigma^*(t, z) = K^*(t, z)\sigma(z) \quad (3)$$

$$R^*(t, z) = K^*(t, z)R(t) \quad (4)$$

$$E^*(t, z) = K^*(t, z)E(t, t_0) \quad (5)$$

Функція $K^*(t, z)$ в наведених формулах по своїй фізичній суті описує деградацію напружень стиснутого бетону $\sigma(z)$, а також тимчасового модуля деформації $E(t, t_0)$, та міцності $R(t)$. Характер зміни функції $K^*(t)$ наведений на рис.3.

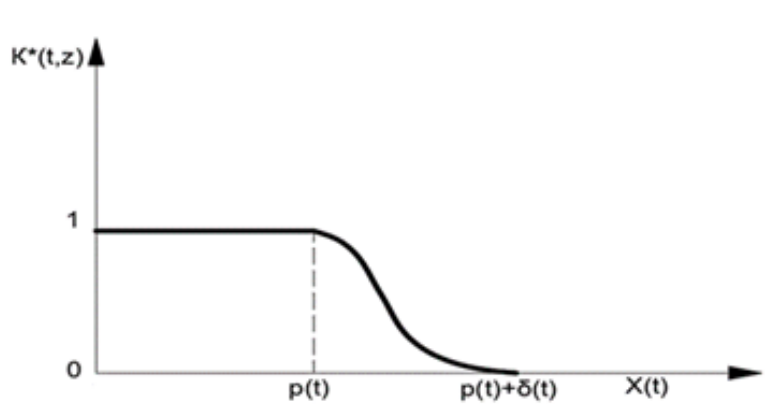


Рис.3. Графік функції $K^*(t)$ в стиснутій зоні

Fig.3. Function graph $K^*(t)$ in the compression area

Табл. 1. Зв'язок між ступенем корозії та міцністю зв'язку

Table 1. Relationship between corrosion degree and bond strength

Рівень корозії, %	Міцність зв'язку, МПа
1	2
0	6,23
20	1,70
40	0,55

Проведені експериментальні дослідження [8] свідчать, що щеплення арматури з бетоном не має значного впливу на деформації розрахункового залізобетонного елемента (див.рис.3).

Міцність зв'язку арматури з бетоном залежно від рівня корозії робочої арматури в середині прольоту наведені в табл.1.

Вплив наявності та відсутності зв'язку між бетоном та арматурою в залізобетонному елементі на переміщення елемента в цілому під дією навантаження різного рівня наведений на рис. 4

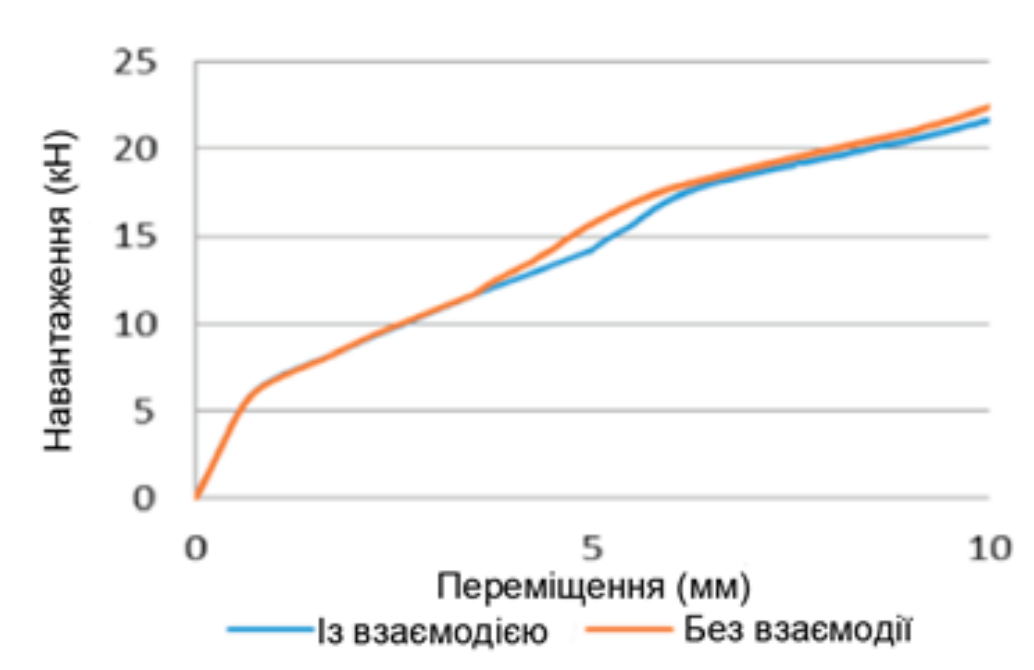


Рис.4. Вплив наявності та відсутності взаємодії між бетоном і арматурою
Fig.4. The influence of the presence and the absence of the interface

Аналіз наведених графіків свідчить про незначний вплив взаємодії між бетоном і арматурою на деформативність залізобетонного елемента в цілому.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

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

З використанням ПК ЛІРА-САПР виконані чисельні дослідження моделей збірних залізобетонних колон будівлі, що мають

пошкодження в місці з'єднання. Зазначенні пошкодження виявлені в результаті натурних обстежень конструкцій, які армовані стержнями різних діаметрів. Схема армування дослідної колони та прийняті перерізи елемента наведені на рис.5.

При розрахунку прийняті наступні передумови: корозія поширюється рівномірно по всьому периметру стержня, товщина корозійного шару становить 1,0мм. За таких умов втрата площі перерізу арматури для арматурних стержнів $\varnothing 14$ мм, становить 32,0%, для стержнів $\varnothing 28$ мм – до 17,0%.

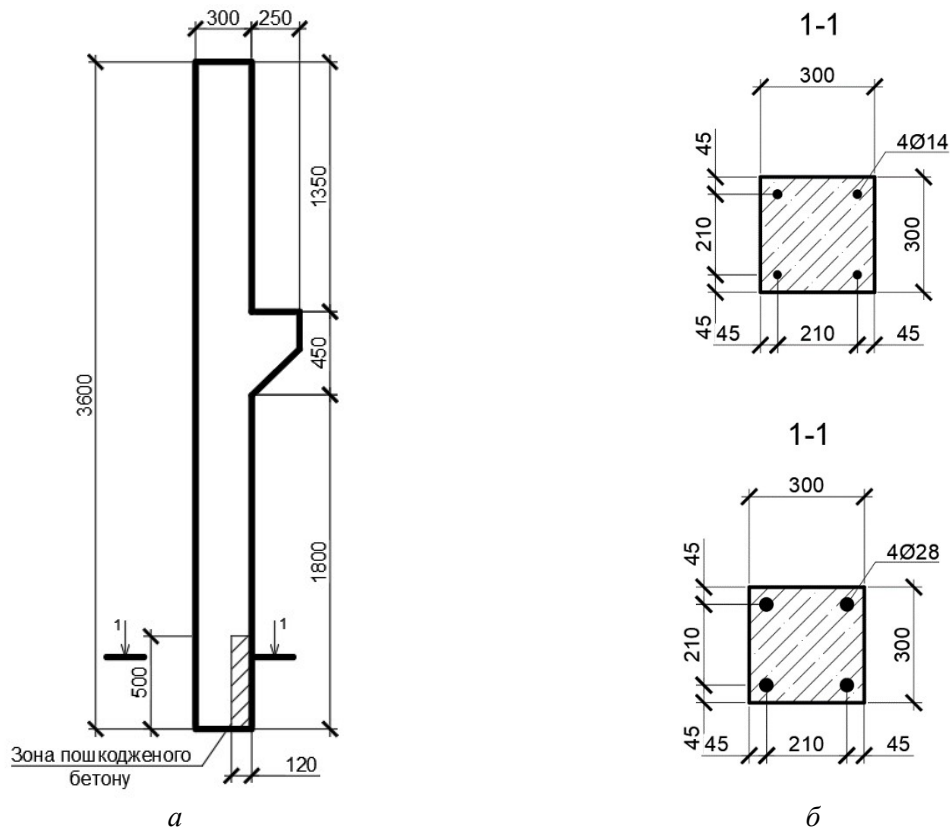


Рис.5. Схема армування колони: а)-загальний вигляд б)-армування перерізів, відповідно, $\varnothing 14\text{мм}$, $\varnothing 28\text{мм}$.

Fig.5. Column reinforcement scheme: a)-general view б)-reinforcement of sections, respectively, $\varnothing 14\text{mm}$, $\varnothing 28\text{mm}$.

Характер зміни граничного повздовжнього зусилля в арматурних стержнях при різній глибині корозійних пошкоджень стержнів наведені на рис.6.

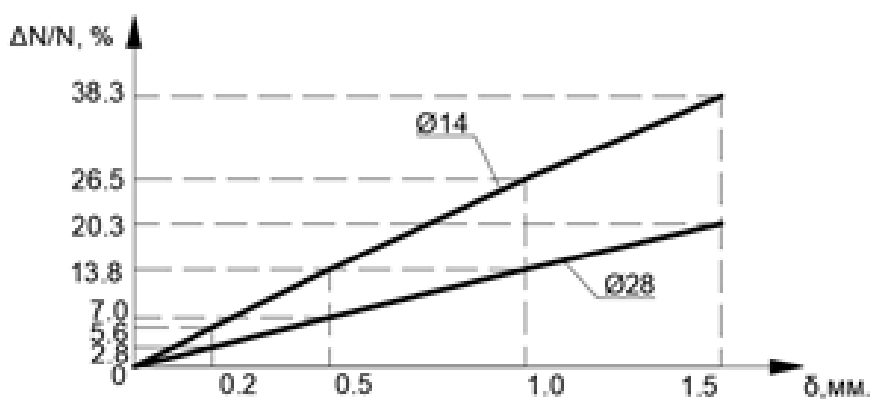


Рис.6. Графік залежності граничного повздовжнього зусилля в арматурних стержнях різного діаметру від глибини корозії

Fig. 6. Graph of the dependence of the ultimate longitudinal force in reinforcing bars of different diameter on the depth of corrosion

За результатами збору навантажень чисельні дослідження колон-близнюків – звичайної і пошкодженої корозією – виконані на дію розрахункового навантаження: по-вздовжня сила $N=500\text{кН}$, та 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 σ_s , збільшилось практично в два рази.

Напруження в розтягнутій арматурі σ_{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. Перекіс колони в площині рами збільшився до 20,0%.

На рис. 7 наведені результати розрахунку моделі колони, армованої стержнями $\varnothing 14\text{ мм}$.

Аналогічні процеси спостерігались і для другої колони, крім того, що значення відносних змін порівнюваних параметрів елемента зменшились, порівняно з першим зразком.

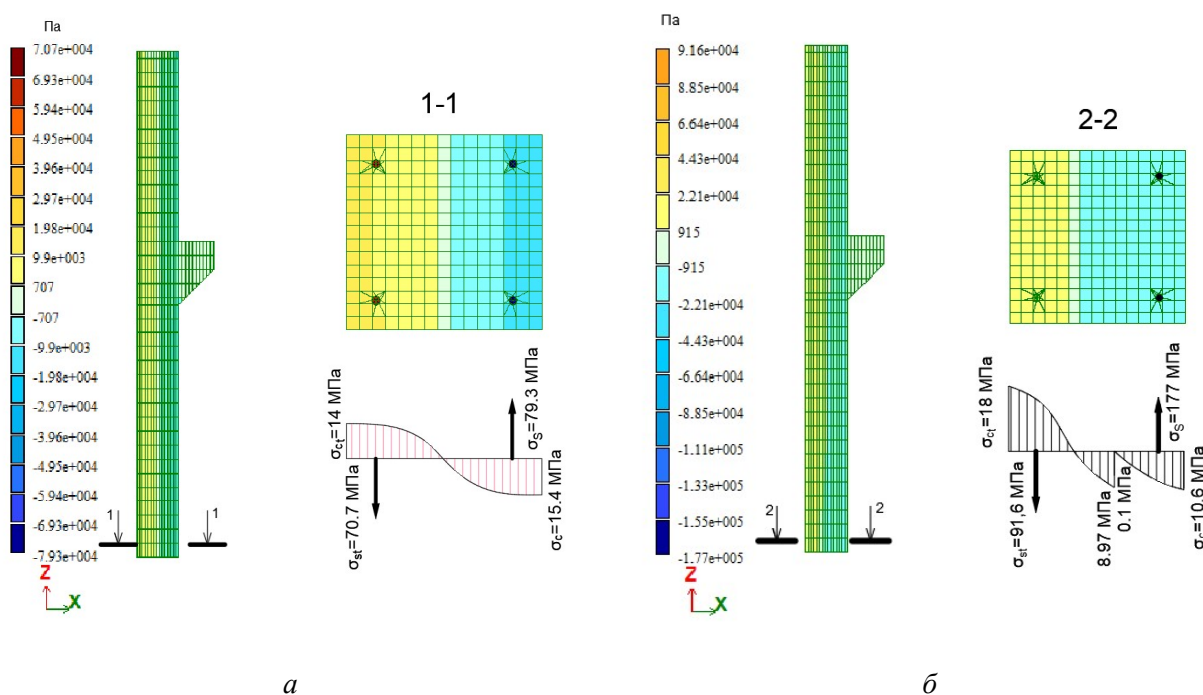


Рис.7. Результати розрахунку елемента:

a – результати розрахунку колони без пошкоджень;

б – результати розрахунку колони з пошкодженнями бетону та арматури.

Fig.7. Elemental calculation results:

a– the results of the calculation of the column without damage;

б – the results of the calculation of the concrete and reinforcement column.

Висота стиснутої зони збільшилась до 20,0%. Напруження в робочій стиснутій арматурі σ_s , збільшилось до 90,0%. Напруження в розтягнутій арматурі σ_{st} – зме-

нилились до 20,0%. Перекіс колони в площині рами збільшився на 14,0%.

Такі результати розрахунку отримані за умови дії однакового навантаження дослідних конструкцій.

Результати розрахунків дослідних елементів наведені в таблиці 2.

Табл. 2. Результати розрахунків дослідних колон.
Table 2. The results of calculations of the research columns

Показник	Колона армована 4Ø14, без корозійних пошкоджень.	Колона армована 4Ø14, з корозійними пошкодженнями.	Зміна кінцевого параметру порівняно із початковим, %.	Колона армована 4Ø28, без корозійних пошкоджень.	Колона армована 4Ø28, з корозійними пошкодженнями.	Зміна кінцевого параметру порівняно із початковим, %.
2	3	4	5	6	7	8
Напруження стиску бетону σ_c , МПа	15,4	10,6	68,8	13,3	8,13	61
Напруження розтягу бетону σ_{ct} , МПа	14	18	28,6	11,8	14,5	23
Напруження стиску арматури σ_s , МПа	79,3	177	123	75,2	139	85
Напруження розтягу арматури σ_{st} , МПа	70,7	91,6	29,6	68,5	80	17
Переміщення вздовж осі X, мм.	20,5	24,6	20	18	20,6	14
Переміщення вздовж осі Z, мм.	2,65	3,23	22	-2,33	-2,7	16

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Згідно результатів розрахунку пошкодження стику колон є небезпечним явищем, що впливає на експлуатаційні якості конструкції. В ушкодженому корозією перерізі відбувається перерозподіл напружень і зусиль. Збільшується висота стиснутої зони бетону, зростають переміщення конструкції, що може негативно позначитись на роботі усєї будівлі, призвести до виникнення таких реакцій суміжних конструкцій, на дію яких вони не були розраховані, і в результаті до руйнування усєї будівлі.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Дронов А.В.** Особенности развития пит-

тинговой коррозии стальной арматуры железобетонных изгибаемых элементов / Дронов А.В. // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* — 2017. — №3. — С. 32-36

2. **Смоляго Г.А., Дронов А.В., Фролов Н.В.** Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды // *Известия Юго-Западного государственного университета.* 2017. Т. 21, № 1(70). С. 43–49.
3. **Бондаренко В.М.** Износ, повреждения и безопасность железобетонных сооружений / В.М. Бондаренко, А.В. Боровских. — М.: ИД Русанова, 2000.— 144 с.
4. **Бондаренко В.М.** Специфика силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных конструкций и новые факторы разрушения // *Строительная механика ин-*

женерных конструкций и сооружений. 2009. №4

5. **Тамразян А. Г., Попов Д. С.** Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 2. С. 19-26.
6. **Ларионова Е.А.** Несущая способность изгибаемого железобетонного элемента при коррозионных повреждениях // *Вестник МГСУ*. 2014. № 7. С. 51—63
7. **Бондаренко В.М., Иванов А.И., Пискунов А.В.** Определение коррозионных потерь несущей способности сжатых железобетонных элементов при решении по СНиП. // *Бетон и железобетон*. №5. 2011. С. 26-29.
8. **Hamidun Mohd Nohl, Nur'ain Idris, Nurazuwa MdNoor, Norliana Sarpin, Rozlin Zainall, and Narimah Kasim.** Structural Effects of Reinforced Concrete Beam. *E3S Web of Conferences 34, CENVIRON 2017*. 2018.

REFERENCES

1. **Dronov A.V.** Osobennosti razvitiya pittingovoy korrozii stalnoy armatury zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. V.G. Shuhova*. — 2017. — №3. — S. 32-36
2. **Smolyago G.A., Dronov A.V., Frolov N.V.** Modelirovanie velichiny korrozionnykh povrezhdeniy armatury zhelezobetonnykh konstruksiy v usloviyah hloridnoy agresivnoy sredy // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017. T. 21, № 1(70). S. 43–49.
3. **Bondarenko V.M.** Iznos, povrezhdeniya i bezopasnost zhelezobetonnykh sooruzheniy / *V.M. Bondarenko, A.V. Borovskih*. — M.: ID Rusanova, 2000.— 144 s.
4. **Bondarenko V.M.** Spetsifika silovogo soprotivleniya povrezhdeniy korrozией zhelezobetonnykh konstruksiy i novye faktory razrusheniya // *Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2009. №4
5. **Tamrazyan A. G., Popov D. S.** Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie korrozionno-povrezhdennykh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskom nagruzhenii // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2019. № 2. S. 19-26.
6. **Larionova E.A.** Nesuschaya sposobnost izgibaемого zhelezobetonного элемента pri kor-

rozionnykh povrezhdeniyah // *Vestnik MGSU*. 2014. № 7. S. 51—63

7. **Bondarenko V.M., Ivanov A.I., Piskunov A.V.** Opredelenie korroziynnykh poter ne-suschet sposobnosti szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri reshenii po SNiP. // *Beton i zhelezobeton*. №5. 2011. S. 26-29.
8. **Hamidun Mohd Nohl, Nur'ain Idris, Nurazuwa MdNoor, Norliana Sarpin, Rozlin Zainall, and Narimah Kasim.** Structural Effects of Reinforced Concrete Beam. *E3S Web of Conferences 34, CENVIRON 2017*. 2018.

IMPACT OF THE CORROSION DAMAGES ON THE OPERATIONAL QUALITIES OF REINFORCED-CONCRETE STRUCTURES

*Lyudmyla Afanasieva,
Maryna Dobrovinska*

Summary. Appraisal of safety of building constructions is one of the main tasks of their performance evaluation. During longterm 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 column models were performed using PC LIRA CAD to assess the impact of corrosion damage on the stress-strain state of the joint collective columns and the possibility of their further operation.

Keywords: corrosion; corrosion damage; reinforcement corrosion; corrosion of reinforced-concrete section.