

УДК 620.179.18

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260220.59.611

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН БЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТУ З ПОШКОДЖЕННЯМ

КОЛОХОВ В.В.^{1*}, к. т. н., доц.,
СОПІЛЬНЯК А. М.², к. т. н., доц.,
МОСЬПАН В. І.³, к. т. н.

^{1*} Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: kolokhov.viktor@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 000-0001-8223-1483

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sopilniak.artem@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3067-0529

^{3*} Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-76, e-mail: mospan.volodumur@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-5359-9067

Анотація. Постановка проблеми. На сьогоднішній день актуальним постає визначення технічного стану конструкцій та їх підсилення за необхідністю. Пошкодження конструкцій впливає на процес визначення фізико-механічних характеристик бетону конструкції. **Мета статті** – визначити вплив пошкоджень конструкції на напружено деформований стан елемента конструкції, виконати розрахунки та отримати поля напружень, деформацій та переміщень за різних параметрів моделі та рівнів напружень. **Виклад матеріалу.** Для досягнення цієї мети проведено дослідження на структурних моделях із використанням програмного комплексу "LIRA SAPR". Для дослідження застосовано структурну модель розмірами 100 × 100 × 400 мм. Використовували бетони класів С16/20, С18/22,5 та С20/25 з відповідними властивостями. Конструктивні пошкодження були змодельовані шляхом послідовного видалення одного з п'яти елементів із дослідної моделі. Розрахунки проводилися для моделей з одним та двома дефектами в конструкції. Для дослідної моделі з двома дефектами в конструкції пази розташовували паралельно. Параметри навантаження для моделювання процесу деформації змінювались у межах 0,1...0,5 від граничного напруження. **Висновки.** Аналіз результатів проведеного дослідження показує, що на зміну напруги в ділянці, яке примикає до пошкоджень конструкції, впливає розмір цієї площі, рівень напружено-деформованого стану в конструктивному елементі та співвідношення між розмірами сусідніх елементів конструкції; на поверхні конструктивного елемента можуть з'являтися нульові зони напруги; необхідно враховувати рівень напружено-деформованого стану під час оцінювання фізико-механічних характеристик бетону за допомогою неруйнівних методів контролю в зоні, на яку впливають наявні пошкодження конструкції.

Ключові слова: напружено-деформований стан елемента; неруйнівні методи контролю

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОВРЕЖДЕНИЕМ

КОЛОХОВ В. В.^{1*}, к. т. н., доц.,
СОПИЛЬНЯК А. М.², к. т. н., доц.,
МОСЬПАН В. И.³, к. т. н.

Аннотация. Постановка проблемы. На сегодняшний день актуальным является определение технического состояния конструкций и их усиление по мере необходимости. Повреждение конструкций влияет на процесс определения физико-механических характеристик бетона конструкции. **Цель статьи** – выполнить расчеты и получить поля напряжений, деформаций и перемещений при различных параметрах модели и уровнях напряжений. **Изложение материала.** Для достижения этой цели проведены исследования на структурных моделях с использованием программного комплекса "LIRA SAPR". Для исследования использована структурная модель размерами 100 × 100 × 400 мм. Использовали бетоны классов С16/20, С18/22,5 та С20/25 с соответствующими свойствами. Конструктивные повреждения были смоделированы путем последовательного удаления одного из пяти элементов с опытной модели. Расчеты проводились для моделей с одним и двумя дефектами в конструкции. Для опытной модели с двумя дефектами в конструкции пазы

располагали параллельно. Параметры нагрузки для моделирования процесса деформации изменялись в пределах 0,1...0,5 от предельного напряжения. **Выводы.** Анализ результатов проведенного исследования показывает, что на изменение напряжения в участке, примыкающем к повреждениям конструкции, влияет размер этой площади, уровень напряженно-деформированного состояния в конструктивном элементе и соотношение между размерами соседних элементов конструкции; на поверхности конструктивного элемента могут появляться нулевые зоны напряжения; необходимо учитывать уровень напряженно-деформированного состояния при оценке физико-механических характеристик бетона с помощью неразрушающих методов контроля в зоне, на которую влияют имеющиеся повреждения конструкции.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние элемент; неразрушающие методы контроля

STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE ELEMENT WITH DAMAGE

KOLOKHOV V.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
SOPILNIAK A.M.², *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
MOSPAN V.I.³, *Cand. Sc. (Tech.)*

^{1*} Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-76, e-mail: kolokhov.viktor@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-8223-1483

² Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sopilniak.artem@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-3067-0529

³ Department of Technology of Building Materials, Products and Structures, State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-76, e-mail: mospa.volodumur@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-5359-9067

Abstract. Problem statement. At present, it is relevant to determine the technical condition of structures and their strengthening as needed. Damage of structures affects the process of determining the physical and mechanical characteristics of concrete structures. **Purpose.** To determine the effect of structural damage on the stressed state of the structural member. To perform calculations and obtain fields of stresses, strains and displacements at different model parameters and stress levels. **The technique.** The research has been performed on structural models using software systems "LIRA SAPR". A structural model having dimensions of 100 × 100 × 400 mm was used for the study. Materials of concrete C16/20, C18/22.5 and C20/25 with corresponding properties have been used. The structural damage was modeled by sequentially removing one of the five elements from the experimental model. The calculations were performed for models with one and two defects in the design. For the experimental model with two defects, the grooves were arranged in parallel. The load parameters for modeling the deformation process varied within 0.1...0.5 of the limit stress. **Results.** Analysis of the results of the study shows that the change in stress in the area adjacent to structural damage is affected by the size of this area, the level of stress-strain state in the structural element and the relationship between the sizes of adjacent structural elements; Zero voltage zones may appear on the surface of the structural member; it is necessary to take into account the level of stress-strain state when assessing the physical and mechanical characteristics of concrete using non-destructive methods of control in the area affected by existing structural damage.

Keywords: stress-strain state of the element; non-destructive control methods

Вступ. Під час експлуатації конструктивного елемента відбувається зміна фізико-механічних характеристик матеріалів та утворення дефектів. Проведення перевірочних розрахунків ґрунтується на визначенні властивостей будівельних матеріалів за допомогою неруйнівних методів. На точність цих методів впливає рівень напружено-деформованого стану конструктивного елемента.

Мінливість властивостей бетону в часі за постійних навантажень постає визначальним фактором міцності та надійності конструктивного елемента. У деяких випадках можуть утворюватися навіть місцеві зони з нульовою напругою. Поява зони без напруги обов'язково буде супроводжуватися появою зони «переходу» з існуючого рівня напруги до нуля, а також появою області з підвищеною напругою. Актуальним бачиться дослідження впливу фізико-механічних характеристик будівель-

ного матеріалу на процес деформації локальної ділянки елемента конструкції, що прилягає до зони конструкції з пошкодженням.

Аналіз публікацій. Забезпечення надійності будівель та споруд [1] вимагає достовірної інформації про їх технічний стан. Системи оцінювання технічного стану базуються на визначенні фізико-механічних характеристик (ФМХ) конструкційних матеріалів. Вимоги до формальної оцінки регулюються державними стандартами [2–7], які застосовують неруйнівні методи контролю (НМК).

Отримані дані підлягають статистичній обробці за встановленими процедурами, а результат обробки отримується з розрахунковою точністю. Як показано у [8–12] та у багатьох інших дослідженнях, на результати оцінювання значно впливають: склад бетонної суміші; умови твердіння бетонних елементів; вік бетону; рівень напружено-деформованого стану (НДС) в елементі та умови навколишнього середовища. Складність прямого визначення ФМХ бетону скеровувала дослідників на інший шлях [13–18]. Але все ж мінливість у рівні НДС елемента залишає процедуру

застосування НМК наближеною до певного рівня невизначеності. Конструктивні дефекти та коливання ФМХ в бетоні під час експлуатації різко змінюють НДС елемента на ділянці біля дефекту.

Визначення впливу цих факторів на НДС конструктивного елемента дозволить підвищити точність визначення ФМХ бетону в елементах за допомогою керування НМК.

Мета статті – виконати розрахунки та отримати поля напружень, деформацій та переміщень за різних параметрів моделі та рівнів напружень

Виклад матеріалу. Для досягнення цієї проведено дослідження на структурних моделях з використанням програмного комплексу "LIRA SAPR". Розміри моделі для досліджень становили $100 \times 100 \times 400$ мм. Для моделювання застосовано бетону (з відповідними властивостями) класів C12/15, C16/20 та C20/25 [2]. Дослідження проводилися за допомогою програмних систем "LIRA SAPR".

На рисунку 1 показано фрагменти дослідної моделі, що використовується для розрахунку за допомогою програмної системи "LIRA SAPR"

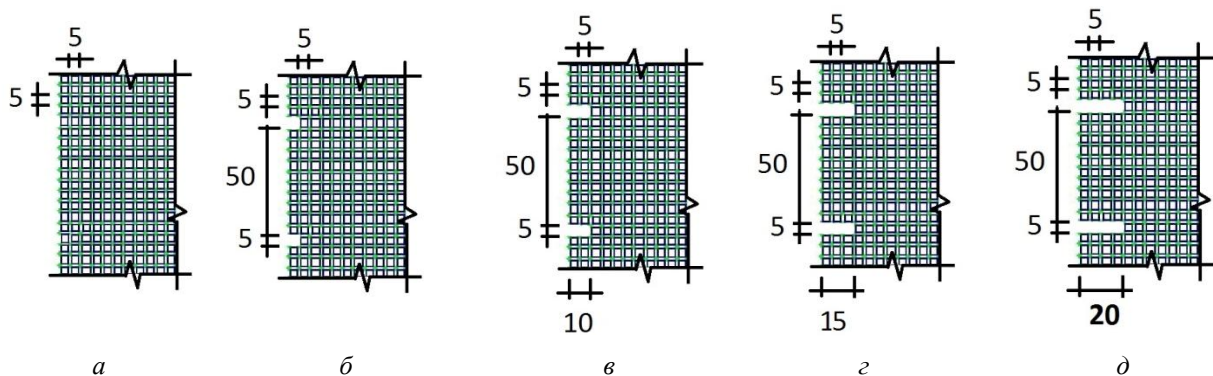


Рис. 1. Фрагмент моделі, використаної для розрахунку програмним комплексом "LIRA SAPR":

а – без пошкоджень; б–д – з пошкодженнями різного розміру (б – 5 мм; в – 10 мм; з – 15 мм; д – 20 мм)

Параметри навантаження для моделювання процесу деформації були в межах $0 \dots 0,5$ від граничного навантаження. Проведені розрахунки дали можливість отримати поля напружень, деформацій та переміщень за різних параметрів моделі та рівнів напружень. Конструктивні пошкодження були змодельовані шляхом послідовного видалення елементів із

дослідної моделі. Тобто в призмі утворився паз глибиною від 5 до 20 мм. Приріст становив 5 мм (з 0 до $0,20h$, відповідно з кроком $0,05h$). Розрахунки проводилися для моделей з одним та двома дефектами в конструкції. Для дослідної моделі з двома дефектами в конструкції пази розташовувались паралельно. Під час

дослідження відстань між цими пазами не змінювалася.

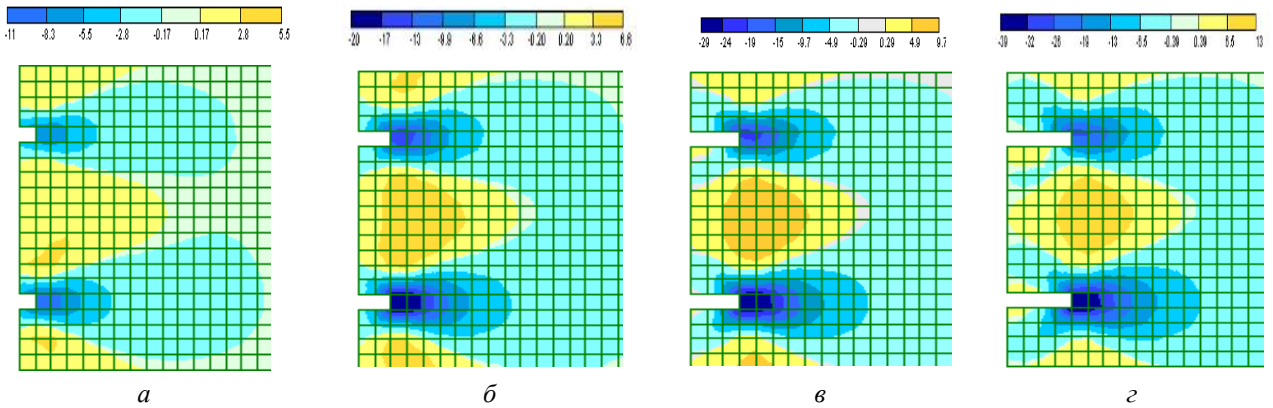


Рис. 2. Поля напружень N_x на ділянці моделі з пошкодженням: розмір пошкодження 5 мм (а), 10 мм (б), 15 мм (в), 20 мм (г) для бетону класу C16/20 при нарузі в бетоні $\sigma = 0.4 f_{cd}$ [кН/м²]

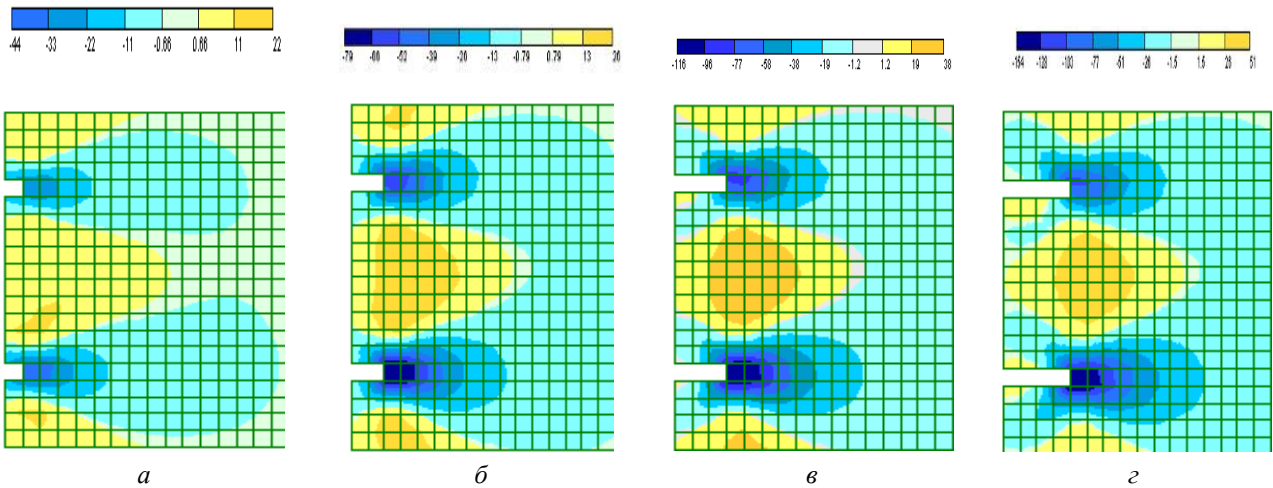


Рис. 3. Поля напружень N_x у ділянці моделі з пошкодженням: розмір пошкодження 5 мм (а), 10 мм (б), 15 мм (в), 20 мм (г) для бетону класу C20/25 з нарузою в бетоні $\sigma = 0,1 f_{cd}$ [кН/м²]

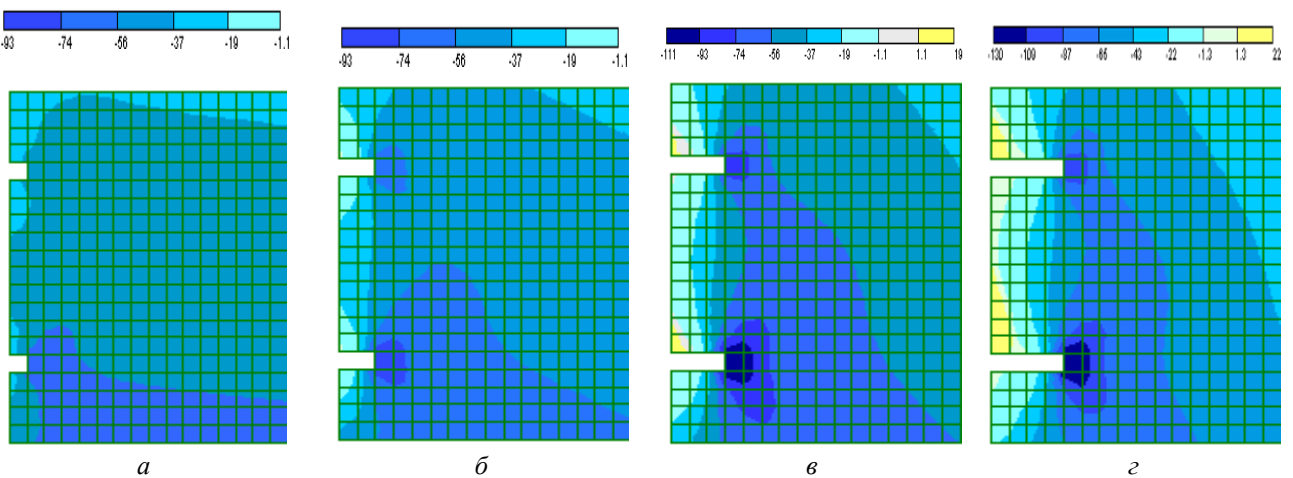


Рис. 4. Поля напружень N_y в ділянці моделі з пошкодженням: розмір пошкодження 5 мм (а), 10 мм (б), 15 мм (в), 20 мм (г) для бетону класу C12/15 при нарузі в бетоні $\sigma = 0,1 f_{cd}$ [кН/м²]

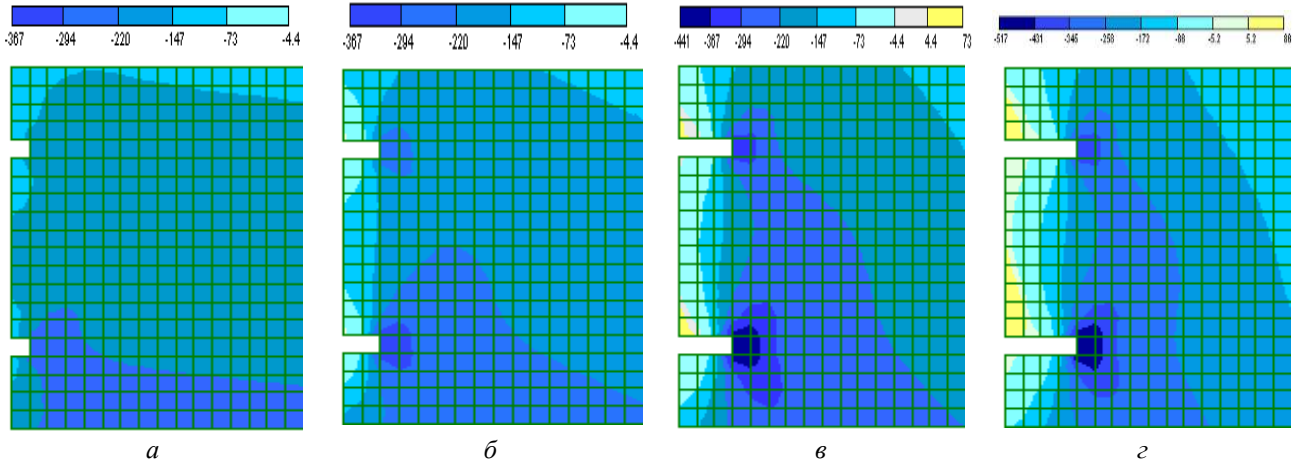


Рис. 5. Поля напружень N_y в ділянці моделі з пошкодженням: розмір пошкодження 5 мм (а), 10 мм (б), 15 мм (в), 20 мм (г) для бетону класу C16/20 при нарузі в бетон $\sigma = 0,4 f_{cd}$ [кН/м²]

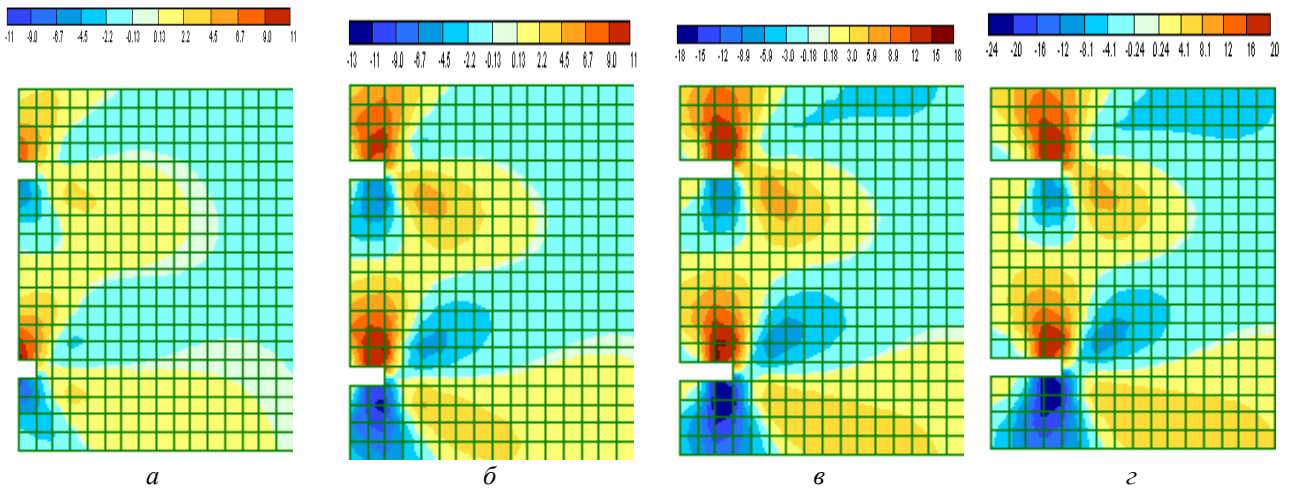


Рис. 6. Поля напруження τ_{xy} в ділянці моделі з пошкодженням: розмір пошкодження 5 мм (а), 10 мм (б), 15 мм (в), 20 мм (г) для бетону класу C12/15 під наругою в бетоні $\sigma = 0,1 f_{cd}$ [кН/м²]

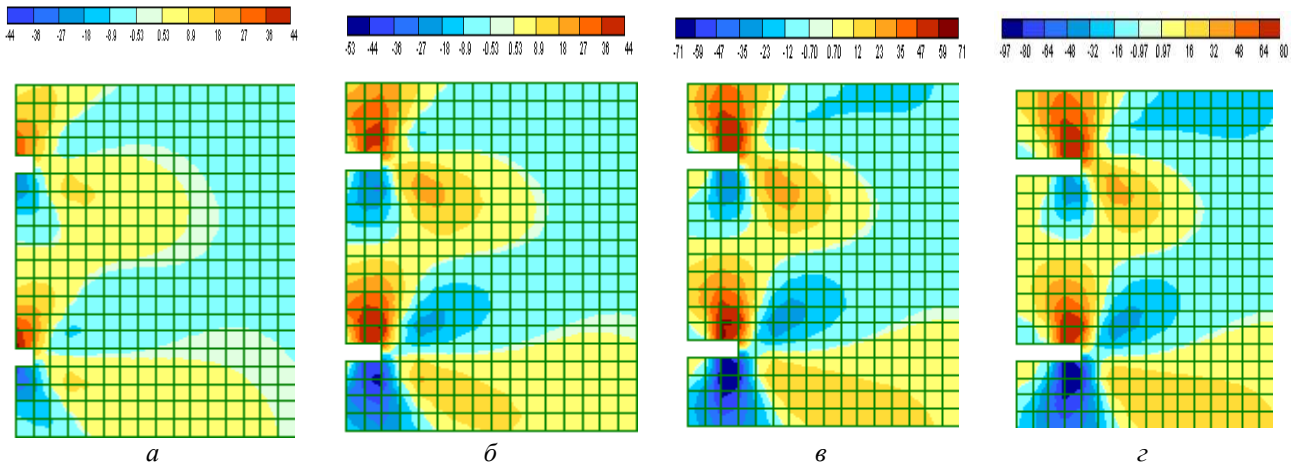


Рис. 7. Поля напружень τ_{xy} в ділянці моделі з пошкодженням: розмір пошкодження 5 мм (а), 10 мм (б), 15 мм (в), 20 мм (г) для бетону класу C20/25 під наругою в бетоні $\sigma = 0,4 f_{cd}$ [кН/м²]

Результати й обговорення. На рисунках 2–7 показані поля напружень N_x , N_y і τ_{xy} (відповідно) в локальній області елемента конструкції із структурними

пошкодженнями. Окремі результати наведено для розрахунків залежно від зміни навантажень та зміни розмірів дефектів.

Очевидно, що поля напружень стиску у всіх випадках схожі. Різні значення напруги зумовлені мінливістю навантажень, ФМХ бетону та розмірами дефектів. Наявність проектних розрахунків забезпечує їх порівняння з результатами НМК. Таке

порівняння дозволяє виявити структурні дефекти, що утворилися в період будівництва та/або експлуатації [19] та використовувати для оцінювання технічного стану будівельного елемента схему, що наведена на рисунку 8.

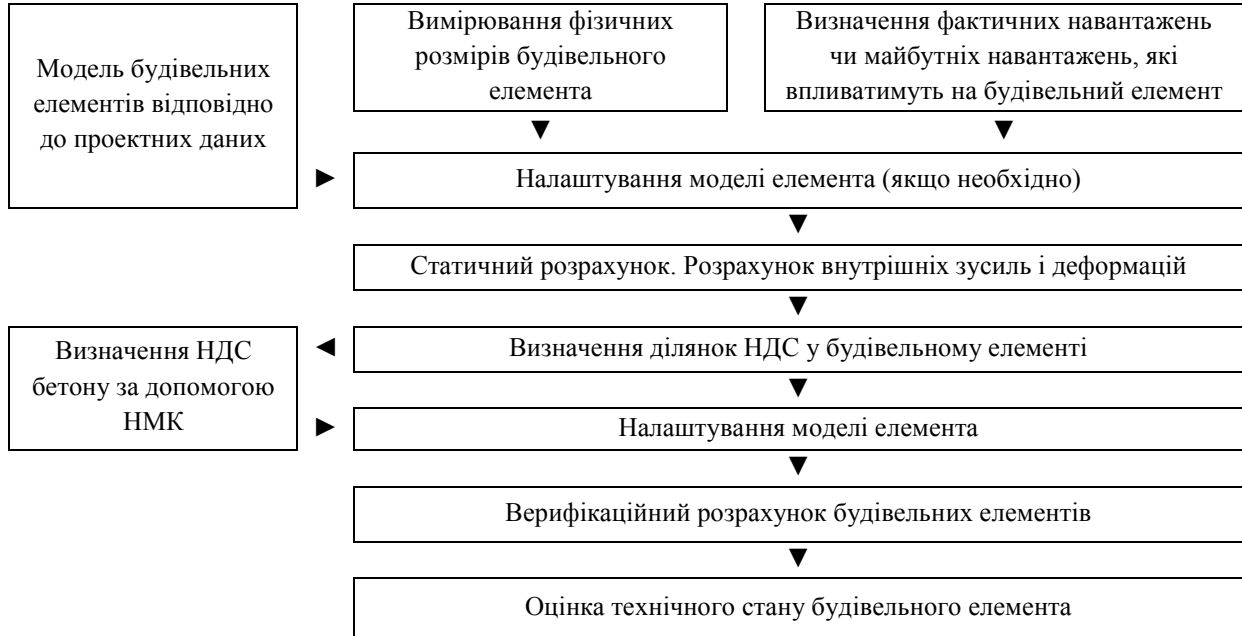


Рис. 8. Порядок оцінювання технічного стану будівельного елемента

Висновки. Аналіз результатів проведеного дослідження показує, що:

- на зміну напруги в ділянці, що примикає до дефектів конструкції, впливає розмір цієї площі, рівень НДС у конструктивному елементі та співвідношення між розмірами сусідніх

елементів конструкції;

- на поверхні конструктивного елемента можуть з'являтися нульові зони напруги;
- необхідно враховувати рівень НДС під час оцінювання ФМХ бетону за допомогою НМК в зоні, на яку впливають наявні дефекти конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження та впливи. Норми проектування [Чинні від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2006. 78 с. (Державні будівельні норми України).
2. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [На заміну СніП 2.03.01-84*; чинні від 2011-06-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 75 с. (Державні будівельні норми України.).
3. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона [Уведено вперше (зі скасуванням ГОСТ 24452-80); чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 16 с. (Національний стандарт України).
4. ДСТУ Б В.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю [Уведено вперше (зі скасуванням ГОСТ 22690-88); чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 20 с. (Національний стандарт України).
5. ДСТУ Б В.2.7-223:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій. [Уведено вперше (зі скасуванням ГОСТ 22690-88); чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 12 с. (Національний стандарт України).
6. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила контролю міцності [Уведено вперше (зі скасуванням ГОСТ 18105-86); чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 23 с. (Національний стандарт України).

7. ДСТУ Б В.2.7-226:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності [Уведено вперше (зі скасуванням ГОСТ 17624-87); чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 27 с. (Національний стандарт України).
8. Kolokhov V., Sopilniak A., Gasii G., Kolokhov O. Structure materialphysic-mechanical characteristics accuracy determination while changing the level of stresses in the structure. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, № 4.8. Pp. 74–78.
9. Колохов В. В., Кожанов Ю. О., Зезюков Д. М. Вплив рівня напруги на швидкість розповсюдження ультразвукових коливань у бетоні конструкцій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 1. С. 49–57.
10. Колохов В. В., Колохов О. В. Зміна часу поширення ультразвукових коливань у бетоні за зміни умов проведення вимірювань. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 2. С. 95–104.
11. Колохов В. В., Колохов О. В. Деякі аспекти вимірювання часу поширення ультразвукових коливань у бетоні. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 3. С. 58–65.
12. Shishkin A., Netesa N., Scherba V. Effect of the iron-containing filler on the strength of concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5/6, № 89. 2017. Pp. 11–16.
13. Mori K., Spagnoli A., Murakami Y., Kondo G., Torigoe I. A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete. *NDT and E International*. Vol. 35, № 6. 2002. Pp. 399–406. URL: [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00009-9).
14. Schabowicz K. Ultrasonic tomography – The latest nondestructive technique for testing concrete members – Description, test methodology, application example. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Vol. 14, № 2. 2014. Pp. 295–303. URL: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.10.006>.
15. Luong M. P. Nondestructive analysis of micro cracking in concrete : proceedings of the International Conference on Nondestructive Testing of Concrete in the Infrastructure, Dearborn, 9–11 June 1993. Michigan (United States), Dearborn, 1993. Pp. 199–217.
16. Weil G. J., Rowe T. J. Nondestructive testing and repair of the concrete roof shell at the Seattle Kingdome. *NDT and E International*. Vol. 31, № 6. 1998. Pp. 389–400. URL: [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(98\)00038-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(98)00038-3).
17. Lacidogna G., Manuella A., Niccolini G., Accornero F., Carpinteri A. Acoustic emission wireless monitoring of structures. Acoustic emission and related non-destructive evaluation techniques in the fracture mechanics of concrete : fundamentals and applications. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2015. Pp. 15–40. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-327-0.00002-7>.
18. Aggelis D. G., Mpalaskas A. C. and Matikas T. E. Acoustic monitoring for the evaluation of concrete structures and materials. Acoustic emission and related non-destructive evaluation techniques in the fracture mechanics of concrete: fundamentals and applications. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2015. Pp. 269–286. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-327-0.00013-1>.
19. Колохов В. В. Формализация процедуры определения физико-механических свойств бетона и её аппаратное обеспечение. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Вып. 69. 2013. С. 231–236.

REFERENCES

1. DBN V.1.2-2: 2006. *Sistema zabezpechenya nadijnosti ta bezpeki budivel'nih ob'ektiv. Navantazhennya ta vplivi. Normi proektuvannya* [The system to ensure the reliability and safety of construction sites. Loads and Impacts. Design Standards]. [Valid from 2007-01-01]. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2006, 78 p. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
2. DBN V.2.6-98: 2009. *Konstrukcii budinkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstrukcii. Osnovni polozhennya* [Structures of buildings and modules. Concrete and reinforced concrete constructions. Main provisions]. [Instead of CN&R 2.03.01-84*; valid from 2011-06-01]. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2009, 75 p. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
3. DSTU B V.2.7-217: 2009. *Budivel'ni materialy. Betonni. Metodi viznachennya prizmovoї micnosti, modulya pruzhnosti i koeficienta Puassona* [Building materials. Concrete Methods of determination. prism strength, modulus of elasticity and Poisson's coefficient]. Official edition. [Valid from 2010-09-01]. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2010, 16 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
4. DSTU B V.2.7-220: 2009. *Budivel'ni materialy. Betonni. Viznachennya micnosti mehanichnimi metodami nerujnivnogo kontrolyu* [Building materials. Concrete Determination of durability by mechanical methods of non-destructive testing]. Official edition. [Valid from 2010-09-01]. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2010, 20 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
5. DSTU B V.2.7-223: 2009. *Budivel'ni materialy. Betonni. Metodi viznachennya micnosti za zrazkami, vidibranimi z konstrukcij* [Building materials. Concrete methods for determining the strength of samples taken from constructions]. Official edition. [Valid from 2010-09-01]. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2010, 12 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).

6. DSTU B V.2.7-224: 2009. *Budivel'ni materialy. Betoni. Pravila kontrolyu micnosti* [Building materials. Concrete rules of strength control]. [Valid from 2010-09-01]. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2010, 23 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
7. DSTU B V.2.7-226: 2009. *Budivel'ni materialy. Betoni. Ultrazvukoviy metod viznachennya micnosti* [Building materials. Concrete Ultrasonic method for determining strength]. [Valid from 2010-09-01]. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2010, 27 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
8. Kolokhov V., Sopilniak A., Gasii G. and Kolokhov O. Structure materialphysic-mechanical characteristics accuracy determination while changing the level of stresses in the structure. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, vol. 7, no. 4.8, pp. 74–78.
9. Kolokhov V.V, Kozhanov Yu.O. and Zeziukov D.M. *Vpliv rivnya naprugi na shvidkist' rozpovsyudzhennya ul'trazvukovih kolivan' u betoni konstrukcij* [Influence of stress level in concrete constructions at ultrasound speed]. *Visnyk Prydniprovsk'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, no. 1, pp. 49–57. (in Ukrainian).
10. Kolokhov V.V. and Kolokhov O.V. *Zmina chasu poshyrennya ul'trazvukovykh kolyvan' u betoni za zminy umov provedennya vymiryuvan'* [Changing the time of ultrasonic oscillation propagation in concrete for changing conditions of measurement]. *Visnyk Prydniprovsk'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, no. 2, pp. 92–101. (in Ukrainian).
11. Kolokhov V.V. and Kolokhov O.V. *Deyaki aspekty vimiryuvannya chasu poshyrennya ul'trazvukovykh kolivan' u betoni* [Some aspects of measuring the time of propagation of ultrasonic vibrations in concrete]. *Visnyk Prydniprovsk'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, no. 3, pp. 58–65. (in Ukrainian).
12. Shishkin A., Netesa N., and Scherba V. Effect of the iron-containing filler on the strength of concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5/6, no. 89, 2017, pp. 11–16.
13. Mori K., Spagnoli A., Murakami Y., Kondo G. and Torigoe I. A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete. *NDT and E International*. Vol. 35, no. 6, 2002, pp. 399–406.
14. Schabowicz K. Ultrasonic tomography – The latest nondestructive technique for testing concrete members – Description, test methodology, application example. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Vol. 14, no. 2, 2014, pp. 295–303.
15. Luong M.P. Nondestructive analysis of micro cracking in concrete. *Proceedings of the International Conference on Nondestructive Testing of Concrete in the Infrastructure*, Dearborn, 9–11 June 1993. Dearborn, Michigan (United States), Dearborn, 1993, pp. 199–217.
16. Weil G.J. and Rowe T.J. Nondestructive testing and repair of the concrete roof shell at the Seattle Kingdome. *NDT and E International*. Vol. 31, no. 6, 1998, pp. 389–400.
17. Lacidogna G., Manuello A., Niccolini G., Accornero F. and Carpinteri A. Acoustic emission wireless monitoring of structures. Acoustic emission and related non-destructive evaluation techniques in the fracture mechanics of concrete: fundamentals and applications. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2015, pp. 15–40.
18. Aggelis D.G., Mpalaskas A.C. and Matikas T.E. Acoustic monitoring for the evaluation of concrete structures and materials. Acoustic emission and related non-destructive evaluation techniques in the fracture mechanics of concrete : fundamentals and applications. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2015, pp. 269–286.
19. Kolokhov V.V. *Formalizatsiya procedury opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv betona i ee apparaturnoe obespechenie* [Formalization of the procedure for determining the physicommechanical properties of concrete and its hardware]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Engineering]. Vol. 69, 2013, pp. 231–236. (in Russian).

Надійшла до редакції: 05.02.2020.