

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДК 624.012.25

Копійка Надія Сергіївна

ДИСЕРТАЦІЯ
НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК З
ПОШКОДЖЕННЯМИ РОБОЧОЇ АРМАТУРИ, ПІДСИЛЕНИХ
КАРБОНОВИМИ СТРІЧКАМИ

Спеціальність 192 – будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань 19 – архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Копійка Н.С.

Науковий керівник: Бліхарський Ярослав Зіновійович, доктор технічних наук,
доцент

Львів –2025 р.

АНОТАЦІЯ

Копійка Н.С. Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192–Будівництво та цивільна інженерія. Галузь знань 19–Архітектура та будівництво – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню несучої здатності залізобетонних балок з корозійними пошкодженнями робочої арматури, які підсилювались карбоновими стрічками. В роботі експериментальним шляхом проаналізовано ефективність застосування композитних матеріалів (карбонових стрічок) Sika Carbodur S512 для відновлення несучої здатності залізобетонних балок з різним ступенем пошкодження термічнозміцненої робочої арматури. Корозійні пошкодження арматури Ø20 A500C різного ступеня було змодельовано шляхом проточування зі зніманням зовнішніх шарів до діаметрів 18, 16, 14, 12 мм, що дозволило оцінити вплив підсилення на несучу здатність і деформативність зразків з корозійними пошкодженнями, еквівалентних втраті площі арматури на 20%-65%, відповідно. Експериментальні дослідження проводились з використанням методики цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) з паралельним вимірюваннями із застосуванням суб-мікронних індикаторів.

У **вступі** обґрунтовано актуальність, мета і задачі досліджень, загальна характеристика та наукова новизна і практична цінність роботи.

В **розділі 1** проведено аналіз попередніх досліджень у галузі відновлення та підсилення залізобетонних конструкцій, виконаних як в Україні, так і за кордоном. Детально проаналізовано основні механізми пошкодження залізобетонних елементів, зокрема корозію арматурної сталі — найпоширенішу причину зниження їхньої несучої здатності. Корозія призводить до зменшення ефективного поперечного перерізу арматури, погіршення адгезії між бетоном і арматурою, а

також до розвитку тріщин, що знижує довговічність та експлуатаційну надійність конструкцій, особливо в агресивних середовищах.

Розглянуто існуючі підходи до підсилення пошкоджених елементів, серед яких традиційні методи реконструкції доповнені сучасними рішеннями на основі композитних матеріалів. Акцентовано увагу на широке впровадження карбонових стрічок, які завдяки високій міцності, хімічній стійкості та технологічній зручності, демонструють ефективність у відновленні функціональності конструкцій з мінімальним втручанням у їхню геометрію.

Важливо, що ефективність підсилення тісно пов'язана з достовірністю діагностики технічного стану. Традиційні методи контролю мають низку обмежень, особливо на ранніх стадіях пошкодження. У цьому контексті метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) розглянуто як перспективний інструмент неруйнівного контролю, здатний з високою точністю відстежувати деформації та тріщини в реальному часі. Наведено огляд застосування ЦКЗ у світовій практиці для моніторингу напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, а також його переваги — зокрема, автоматизований збір даних, висока просторово-часова роздільність і можливість застосування до повнорозмірних зразків.

На підставі проведеного аналітичного огляду сформульовано основні завдання дослідження, які заклали основу для розробки комплексної методики, представленої в наступних розділах роботи.

Другий розділ присвячений розробленню методики експериментальних досліджень включно з визначенням пріоритетних факторів, плануванням програми випробувань та удосконалення інструментальних підходів. На основі факторного аналізу сформовано оптимальну програму випробувань, яка охоплює 12 залізобетонних балок з термічнозміцненою арматурою Ø20 мм, пошкодженою до ефективного діаметра в діапазоні 18–12 мм, що дозволило змодельовати різні стадії корозії та її впливу на несучу здатність. Для забезпечення надійної оцінки фізико-механічних властивостей бетону виготовлено також 9 бетонних призм розміром 600×150×150 мм і 15 бетонних кубиків 150×150×150 мм. На основі випробування призм побудовано повну діаграму деформування з низхідною віткою, що було

досягнуто завдяки застосуванню методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Методика цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) вдосконалена шляхом визначення оптимальних параметрів спекла (оптимальних співвідношень розмірів крапок, їх щільності і варіативності), що забезпечило точне та стабільне відстеження деформацій на поверхні бетону. Крім того, розширено метод ЦКЗ шляхом використання різних підходів до підготовки досліджуваної поверхні: з безпосередніх нанесенням спеклу і штучними маркерами, що забезпечило підвищену адаптивність у визначенні параметрів напружено-деформованого стану. Це значно підвищило адаптивність методу до роботи з повнорозмірними зразками.

Методика також передбачає застосування суб-мікронних індикаторів для фіксації деформацій та прогинів на всіх етапах навантаження до руйнування. Комплексний підхід до вимірювання – із паралельним застосуванням ЦКЗ та суб-мікронних індикаторів – забезпечив високоточну фіксацію напружено-деформованого стану дослідних елементів у реальному часі.

Особлива увага приділена розробці методики підсилення: використано карбонову стрічку Sika Carbodur S512 з попередньо обґрунтованою схемою анкерування, яка гарантує сумісну роботу матеріалу підсилення зі зразком і запобігає відшаруванню карбонових стрічок. У **третьому** розділі надані результати випробування експериментальних досліджень бетону і повнорозмірних згинаних елементів (залізобетонних балок). Використовуючи цифрову кореляцію зображень за вдосконаленою методикою, визначено фізико-механічні характеристики бетону та здійснено моніторинг деформацій у реальному часі.

Результати показали, що застосування карбонової стрічки SikaCarbodur S512 дозволяє повністю відновити або навіть перевищити початкову несучу здатність конструкцій із пошкодженням арматури до 36 %. Для більш серйозних ушкоджень (до 64 % втрати площі арматури) досягнуто часткове відновлення на рівні 79–95 %(якщо прийняти початкову несучу здатність як 100%). Найбільший ефект підсилення спостерігався у зразках з найбільшими пошкодженнями (до ефективного діаметру арматури 12 мм).

Порівняльний аналіз показав, що підсилення зменшило прогини в усіх серіях на 14–32 % у порівнянні з непідсиленими зразками з одночасним зростанням згинального моменту до досягнення граничного прогину вдвічі. Ступінь використання композитної стрічки зафіксовано на рівні 76–84 % за стандартом FIB Bulletin, що свідчить про ефективну роботу матеріалу в умовах підвищених навантажень.

Точність експерименту підтверджена незначними відхиленнями (до 5–7 %) між показами цифрової кореляції зображень та традиційних індикаторів деформацій, що підтверджує доцільність використання ЦКЗ як надійного методу моніторингу технічного стану конструкцій при підсиленні.

В розділі 4 запропоновано методику визначення несучої здатності залізобетонних балок з пошкодженнями термічно-зміцненої арматури (підсилених карбоновими стрічками і непідсилених контрольних) на базі деформаційної моделі згідно діючих норм ДСТУ Б В.2.6-156:2010 та ДБН В.2.6-98:2009. Особливістю запропонованого алгоритму є врахування неоднорідності характеристик міцності в межах поперечного перерізу стержня із використанням регресійної моделі межі текучості арматури у формі рівняння Больцмана.

У межах роботи виконано порівняльну оцінку несучої здатності та деформативності залізобетонних балок за результатами експериментів і теоретичних розрахунків. Встановлено, що теоретичні значення моментів текучості та граничної несучої здатності узгоджуються з експериментальними з відхиленням, що не перевищує 15 %. Такі результати підтверджують надійність існуючих нормативних підходів та наявність певного запасу міцності, закладеного у проектні розрахунки.

Аналіз прогинів та деформацій показав, що теоретичні моделі адекватно відображають поведінку конструкцій до моменту руйнування бетону, хоча після цього етапу експериментальні прогини перевищували розрахункові (в межах 15%). Водночас, для композитної стрічки визначено, що фактичні деформації були меншими за теоретичні з відхиленням до 12 %, що вказує на ефективне використання матеріалу підсилення.

Результати аналізу процесів тріщиноутворення підтвердили високу тріщиностійкість зразків після підсилення, а збіг між теоретичними та експериментальними даними засвідчив доцільність використання розробленої регресійної моделі у проектній практиці.

Ключові слова: залізобетон, балка, несуча здатність, деформативність, міцність, корозія, пошкодження, підсилення, відновлення, композитні матеріали, карбонові стрічки, термічно-зміцнена арматура, напружено-деформований стан, цифрова кореляція зображень, навантаження.

ABSTRACT

Kopiika N.S. Load-bearing capacity of reinforced concrete beams with damaged reinforcement, strengthened with carbon tapes. -Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation to obtain the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the speciality 192 – Construction and Civil Engineering, in the area of expertise 19 – Architecture and Construction, Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation work is devoted to the study of the bearing capacity of reinforced concrete beams with corrosion damage to the working reinforcement, which were reinforced with carbon tapes. The work experimentally analysed the effectiveness of using composite materials (carbon tapes), Sika Carbodur S512, to restore the bearing capacity of reinforced concrete (RC) beams with varying degrees of damage to thermally strengthened working reinforcement. Corrosion damage to Ø20 A500C reinforcement of varying degrees was simulated by grinding with removal of the outer layers to diameters of 18, 16, 14, 12 mm, which allowed us to assess the effect of strengthening on the bearing capacity and deformability of samples with corrosion damage equivalent to a loss of reinforcement area by 20%-65%, respectively. Experimental studies were conducted using the digital image correlation (DIC) technique with parallel measurements using sub-micron indicators.

The **introduction** substantiates the research's relevance, purpose and objectives, general characteristics, scientific novelty and practical value of the work.

In **section 1**, an analysis of previous research in the field of restoration and strengthening of reinforced concrete structures, carried out both in Ukraine and abroad, is conducted. The main mechanisms of damage to reinforced concrete elements are analysed in detail, particularly corrosion of reinforcing steel, the most common cause of a decrease in their bearing capacity. Corrosion leads to a reduction of the effective cross-section of the reinforcement, deterioration of adhesion between concrete and reinforcement, and the development of cracks, which reduces the durability and operational reliability of structures, especially in aggressive environments.

Existing approaches to strengthening damaged elements are considered, among which traditional reconstruction methods are supplemented by modern solutions based on composite materials. Attention is focused on the widespread introduction of carbon tapes, which, due to their high strength, chemical resistance and technological convenience, demonstrate effectiveness in restoring the functionality of structures with minimal interference in their geometry.

It is important to note that the effectiveness of reinforcement is closely related to the accuracy of diagnostics of the technical condition. Traditional control methods have several limitations, especially in the early stages of damage. In this context, the digital image correlation (DIC) method is considered a promising non-destructive control tool capable of tracking deformations and cracks in real time with high accuracy. An overview of the use of DIC in world practice for monitoring the stress-strain state of reinforced concrete elements and its advantages - in particular, automated data collection, high spatial-temporal resolution and the possibility of application to full-size samples.

Based on the analytical review, the main research objectives were formulated, which laid the foundation for the development of a comprehensive methodology presented in the following sections of the work.

The second section is devoted to the development of experimental research methodology, including the determination of priority factors, planning of the test program and improvement of instrumental approaches. Based on factor analysis, an optimal test

program was formed, which covers 12 reinforced concrete beams with thermally strengthened reinforcement $\varnothing 20$ mm, damaged to an effective diameter in the range of 18–12 mm, allowing modelling of different corrosion reduction stages of the bearing capacity. To ensure a reliable assessment of deformability and crack resistance, 9 concrete prisms measuring $600 \times 150 \times 150$ mm and 15 concrete cubes $150 \times 150 \times 150$ mm were also manufactured. A full deformation diagram with a descending branch was obtained based on the prism tests. The digital image correlation (DIC) technique was improved by determining the optimal spectrum parameters, which ensured accurate and stable tracking of deformations on the concrete surface. In addition, the DIC method was expanded by using different approaches to preparing the studied surface: with direct application of the spectrum and artificial targets, which increased adaptability in determining the parameters of the stress-strain state. This significantly increased the adaptability of the method to work with full-size samples.

The method also involves using sub-micron indicators to record deformations and deflections at all stages of loading until failure. An integrated approach to measurement, with the parallel use of DIC and sub-micron indicators, provided highly accurate recording of the stress-strain state of the test elements in real time.

Special attention was paid to the development of the reinforcement method: Sika Carbodur S512 carbon tape was used with a previously substantiated anchoring scheme, which guarantees the compatible operation of the reinforcement material with the sample and prevents delamination.

The third section presents the results of experimental studies of concrete and full-size bent elements (RC beams). Using digital image correlation according to an improved technique, the physical and mechanical characteristics of concrete were determined, and deformations were monitored in real time.

The results showed that using SikaCarbodur S512 carbon tape allows for the complete restoration or even exceeding the initial bearing capacity of structures with reinforcement damage up to 36%. For more serious damage (up to 64% loss of reinforcement area), partial restoration at the level of 79–95% was achieved. The most significant effect of reinforcement was observed in samples with critical damage.

Comparative analysis showed that reinforcement reduced deflections in all series by 14–32% compared to unreinforced samples, with a simultaneous increase in bending moment to the limiting deflection by half. The degree of use of the composite tape was recorded at 76–84% according to the FIB Bulletin standard, indicating the effective operation of the material under increased loads.

The accuracy of the experiment is confirmed by minor deviations (up to 5–7%) between the readings of digital image correlation and strain indicators, which confirms the feasibility of using DIC as a reliable method of monitoring the technical condition of structures during reinforcement.

In **section 4**, a methodology for determining the bearing capacity of reinforced concrete beams with damage to thermally strengthened reinforcement (both strengthened with carbon tapes and unstrengthened control) is proposed based on a deformation model in accordance with the current standards DSTU B V.2.6-156:2010 and DBN V.2.6-98:2009. A feature of the proposed algorithm is the consideration of the heterogeneity of strength characteristics within the cross-section using a regression model of the yield strength of reinforcement in the form of the Boltzmann equation.

Within the framework of the work, a comparative assessment of the bearing capacity and deformability of reinforced concrete beams was performed based on the results of experiments and theoretical calculations. It was established that the theoretical values of the yield moments and ultimate bearing capacity are consistent with the experimental ones, with a deviation not exceeding 15%. Such results confirm the reliability of existing regulatory approaches and the presence of a certain safety margin built into the design calculations.

Analysis of deflections and deformations showed that theoretical models adequately reflect the behavior of structures until the moment of concrete failure, although after this stage the experimental deflections exceeded the calculated ones. At the same time, for the composite tape, it was determined that the actual deformations were less than the theoretical ones, with a deviation of up to 12%, which indicates the effective use of the reinforcement material.

Results of the analysis of crack formation processes confirmed the high crack resistance of the specimens after reinforcement, and the coincidence between theoretical and experimental data demonstrated the feasibility of using the developed regression model in design practice.

Keywords: reinforced concrete beam, load-bearing capacity, deformability, strength, corrosion, damage, reinforcement, restoration, composite materials, carbon tapes, thermally strengthened reinforcement, stress-strain state, DIC, carbon fibre reinforced polymers (CFRP), experimental design.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ОСНОВНОЮ ТЕМОЮ НАУКОВОЇ РОБОТИ

Публікації у закордонних наукових періодичних виданнях

1. Blikharskyu Y., Kopyika N., Selejdak J. (2020) Non-uniform corrosion of steel rebar and its influence on reinforced concrete elements' reliability. *Production Engineering Archives*, 26(2), 67-72. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.14> (Scopus Q2, WOS) (*Blikharskyu Y.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копііка N.: проведено огляд літературних джерел, проведено дослідження; запропонована методика досліджень; проведено теоретичні дослідження; Selejdak J.: визначено напрям і основні завдання досліджень*).
2. Blikharskyu Y., Selejdak J., Kopyika N. (2021) Specifics of Corrosion Processes in Thermally Strengthened Rebar. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00646, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00646> (Scopus, Q1) (*Blikharskyu Y.: запропонована методика досліджень, виконано аналіз отриманих результатів, сформовано висновки; Selejdak J.: визначено напрям і основні завдання досліджень; Копііка N: сформульовано мету досліджень, проведено дослідження, сформовано аналіз літературних джерел, виконано komponuvannya statmti*).
3. Blikharskyu Y., Selejdak J., Kopyika N. (2021) Corrosion fatigue damages of rebars under loading in time. *Materials*, 14(12), 3416; <https://doi.org/10.3390/ma14123416> (Scopus Q2, WOS) (*Blikharskyu Y.:*

запропонована методика досліджень, проведено дослідження, виконано аналіз отриманих результатів, сформовано висновки; Selejdak J.: визначено проблему і основні завдання досліджень; Копііка N.: сформульовано мету досліджень, сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті)

4. Koppiika N., Vegera, P., Vashkevych, R., Blikharskyu, Z. (2021) Stress-strain state of damaged reinforced concrete bended elements at operational load level. *Production Engineering Archives*, 27(4), 242-247. <https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.32> (Scopus Q2, WOS) (Копііка N.: сформовано мету досліджень, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки; Vegera P.: сформовано програму досліджень, проведено експериментальні випробування; Vashkevych R.: сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті; Blikharskyu Z.: визначено напрям, проблему і завдання досліджень, редагування, надання фахових консультацій).

5. Blikharskyu Y., Koppiika N., Khmil R., Selejdak J., Blikharskyu Z. (2022) Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress–Strain State of RC Structures. *Applied Sciences*, 12(19), 10157. <https://doi.org/10.3390/app121910157> (Scopus Q2, WOS) (Blikharskyu Y.: запропоновано методику досліджень, розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів сформовано висновки; Копііка N.: сформовано мету досліджень, сформовано аналіз літературних джерел, проведено теоретичні дослідження, виконано компонування статті; Khmil R.: складено план досліджень, проведено аналіз результатів; Selejdak J.: визначено проблему досліджень; Blikharskyu Z.: визначено напрям і завдання досліджень, редагування, надання фахових консультацій).

6. Koppiika, N., Selejdak, J., Blikharskyu, Y. (2022). Specifics of physico-mechanical characteristics of thermally-hardened rebar. *Production Engineering Archives*, 28(1), 73-81. <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.09> (Scopus Q2, WOS). (Копііка N.: сформовано мету досліджень, проведено дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, виконано компонування статті; Selejdak J.: визначено напрям і завдання досліджень, редагування; Blikharskyu Y.: запропоновано

методику досліджень, проведення досліджень, розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів, сформовано висновки).

7. Blikharskyu, Y., Kopyika, N., Khmil, R., & Blikharskyu, Z. (2023). Digital Image Correlation Pattern for Concrete Characteristics—Optimal Speckle. In *International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów*, 22-31. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_3 (Scopus Q4, WoS) (Blikharskyu Y.: визначено напрям і завдання досліджень, проведено експериментальні дослідження; Kopyika N.: запропонована методика досліджень, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки, редагування; Khmil R.: сформовано програму досліджень, виконано компонування статті, надання фахових консультацій; Blikharskyu Z.: визначено проблему досліджень, сформовано мету досліджень, надання фахових консультацій).

8. Kopyika, N., Blikharskyu, Y. (2024) Digital image correlation for assessment of bridges' technical state and remaining resource. *Structural Control and Health Monitoring*, 2024(1), 1763285. <http://dx.doi.org/10.1155/2024/1763285> (Scopus Q1, WoS). (Kopyika N.: сформовано мету досліджень, проведено теоретичні дослідження, сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: визначено напрям і завдання досліджень).

9. Kopyika, N., Blikharskyu, Y., Khmil, R., Tereshko, A. (2024). Design of Experiment for Facilitating Effective Research Program Development. In *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering*, 266-280. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_24 (Scopus Q4). (Kopyika, N.: сформульовано актуальність дослідження, проведено дослідження, проведено валідацію результатів, формальний аналіз, огляд і редагування; Blikharskyu Y.: проведено візуалізацію, проведено редакцію тексту; Khmil R.: проведено перевірку, згідно з нормативними документами; Tereshko, A.: сформульовано актуальність дослідження, проведено валідацію результатів, формальний аналіз, огляд і редагування).

10. Koptika, N., Klym, A., Blikharskyu, Y., Katunsky, D., Popovych, V. Blikharskyu, Z. (2024) Evaluation of the stress-strain state of the RC beam with the use of DIC. *Production Engineering Archives*, Sciendo, 30(4), 463-476. <https://doi.org/10.30657/pea.2024.30.44> (Scopus Q2, WOS) (Koptika N.: запропоновано методику експериментальних випробувань, і експериментальну програму, виконано компонування статті, виконано теоретичні розрахунки; Клим А.: проведено експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, виконано моделювання МСЕ в програмі Femap; Blikharskyu Y.: консультування з використання обладнання і методики ЦКЗ; Katunsky D.: розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів; Popovych V.: участь в оформленні бібліографічних посилань; Blikharskyu Z.: надання фахових консультацій, редагування).
11. Koptika, N., Blikharskyu, Y., Selejdak, J., Khmil, R., Blikharskyu, Z., Katunsky, D. (2024). CFRP Materials for Restoration of the Bearing Capacity of RC Beams With Damaged Rebar. *Journal of Engineering*, 2024(1), 4915391. <http://dx.doi.org/10.1155/2024/4915391> (Scopus Q2, WOS) (Koptika N. : проведено експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів, надання консультацій з методики підсилення; Selejdak J.: визначено проблеми і завдання досліджень; Khmil R.: сформовано мету досліджень, запропонована методика досліджень; Blikharskyu Z.: надання фахових консультацій, редагування; Katunsky D.: участь в оформленні бібліографічних посилань, надання фахових консультацій).
12. Koptika, N., Blikharskyu, Y., Selejdak, J., Khmil, R., Blikharskyu, Z. (2025). Reliability-based analysis and residual life forecasting for corrosion-affected RC structures. In *Structures*, 76, 108965. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108965> (Scopus Q1, WOS) (Koptika N.: запропонована методика досліджень, виконано теоретичні розрахунки, виконано аналіз результатів досліджень, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: визначено напрям, проблеми і завдання досліджень; Selejdak J.: участь в оформленні бібліографічних

посилань, Khmil R.: сформовано мету досліджень; Blikharskyu, Z.: надання фахових консультацій, редагування).

13. Koptika, N., Blikharskyu, Y., Khmil, R., Blikharskyu, Z. (2025). Probabilistic assessment of RC beams with corroded thermally strengthened reinforcement. In Structures, 77, 109104. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109104> (Scopus Q1, WOS) (Koptika N.: запропонована методика досліджень, виконано теоретичні розрахунки, виконано аналіз результатів досліджень, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: визначено напрям, проблеми і завдання досліджень; Khmil R.: сформовано мету досліджень, надання фахових консультацій; Blikharskyu, Z.: надання фахових консультацій, редагування)

14. Koptika N., Blikharskyu Y., Sobko Y., Khmil R., Blikharskyu Z. (2025) Impact of CFRP-strengthening on Crack Formation in RC Structures. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. (1499), No 01202. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012021> (Koptika N. : проведено експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів ; Sobko Y.: визначено проблеми і завдання досліджень, надання консультацій з методики підсилення; Khmil R.: сформовано мету досліджень, запропонована методика досліджень; Blikharskyu Z.: надання фахових консультацій, редагування)

Публікації у наукових фахових виданнях України

15. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. (2019) Дослідження методик моніторингу і моделювання корозійних процесів в залізобетонних елементах. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, (77), 29–37. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-29-37> (Бліхарський Я. З.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копійка Н. С.: сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті)

16. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. (2019) Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення.

Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць, 37, 316–322. <http://dx.doi.org/10.31713/budres.v0i37.300> (Бліхарський Я. З.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копійка Н. С.: сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті)

17. Blikharskyu, Y. Z., Kopyika, N. S. (2020). Influence of steel rebar uniform corrosion on reinforced concrete structures strength. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (79), 34-42. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-34-42> (Blikharskyu Y. Z.: сформульовано мету досліджень, проведено дослідження, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Kopyika N. S.: запропонована методика досліджень, проведено дослідження, виконано компонування статті)

18. Blikharskyu Y., Kopyika N. (2020) Digital image correlation method for analysis of reinforced concrete structures. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (78), 27–33. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2020-78-27-33> (Blikharskyu Y.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Kopyika N.: сформовано аналіз літературних джерел, розроблено ілюстративний матеріал, виконано компонування статті).

19. Blikharskyu Y., Kopyika N. (2021) Methods for determination of deformations with the use of Digital Image Correlation technologies. *Scientific Journal “Theory and Building Practice” Practice*, 3(2), 67-75. <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.02.067> (Blikharskyu Y.: визначено проблеми і завдання досліджень, надання фахових консультацій, редагування; Kopyika N.: сформульовано мету досліджень, сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті)

20. Kopyika, N., Blikharskyu, Y. (2022). Effectiveness of strengthening of reinforced concrete beams with the use of composite materials. *Scientific Journal “Theory and Building Practice”*, 4(2), 7-16. <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.02.007> (Kopyika N.: запропонована методика досліджень, виконано теоретичні розрахунки і дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки, виконано компонування статті; Blikharskyu Y.: визначено напрям і сформульовано

мету досліджень, визначено проблеми і задачі дослідження, надання фахових консультацій, редагування).

21. Blikharskyu Y., Kopyika N. (2022) Analysis of the most common damages in reinforced concrete structures. *Scientific Journal "Theory and Building Practice"*, 4(1), 35-42. <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.01.035> (Blikharskyu Y.: визначено напрям і сформульовано мету досліджень, визначено проблеми і завдання досліджень; Kopyika N.: сформовано аналіз літературних джерел, сформовані висновки, виконано komponuvannya statmi)

22. Kopyika N., Blikharskyu, Y. (2023). Perspectives and specific features of the use of composite materials for strengthening of damaged reinforced concrete structures. December 2023, *Scientific Journal "Theory and Building Practice"*, (2), 27-34. <http://dx.doi.org/10.23939/jtbp2023.02.027> (Kopyika N.: сформульовано мету досліджень, сформовано аналіз літературних джерел, сформовані висновки, виконано komponuvannya statmi; Blikharskyu Y.: визначено напрям і сформульовано мету досліджень, визначено проблеми і завдання досліджень, аналіз результатів дослідження, надання фахових консультацій)

Наукові праці, які засвідчують апробацію дисертації

23. Бліхарський Я. З., Вашкевич Р.В. Копійка Н.С. Бобало Т.В., Бліхарський З.Я. Визначення залишкової міцності залізобетонних балок з пошкодженням, що виникли при дії навантаження (2020). International Scientific Conference EET-2020 «Energy Efficiency In Transport», 67-69, November 18-20, 2020, Kharkiv, Ukraine (Бліхарський Я. З.: сформульовано мету досліджень, визначено напрям і завдання досліджень; Вашкевич Р.В.: запропоновано методику експериментальних випробувань, редагування; Копійка Н.С.: сформовано аналіз літературних джерел, сформовані висновки, виконано komponuvannya statmi; Бобало Т.В.: виконано експериментальні дослідження; Бліхарський З.Я.: сформовано план досліджень, надання фахових консультацій)

24. Бліхарський Я.З., Хміль Р.Є., Копійка Н.С., Бліхарський З.Я. Експериментальні дослідження залізобетонних згинальних елементів з пошкодженою робочою арматурою. Тези VII Міжнародній конференції «Актуальні

проблеми інженерної механіки» (Одеса, Україна, 12-15 травня, 2020 року), 172-173. (Бліхарський Я.З.: сформульовано мету досліджень, виконано експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів дослідження; Хміль Р.Є.: визначено напрям, завдання дослідження, сформовано програму досліджень; Копійка Н. С.: сформовано аналіз літературних джерел, сформовані висновки, виконано компонування; Бліхарський З.Я.: запропоновано методику досліджень; надання фахових консультацій)

25. Kopiika N., Blikharskyu Y.Z. (2024, April). The use of CFRP materials for strengthening of RC beams with corrosion damages of rebar. Тези Міжнародної Науково-технічної конференції «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (Одеса, Україна, 23 квітня 2024 року), 67-70 (Kopiika N.: запропонована методика досліджень, проведено експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки; Blikharskyu Y.Z.: сформовано напрям, мету і завдання досліджень, редагування, надання фахових консультацій).

Додаткові публікації, які висвітлюють тему дослідження :

1. Blikharskyu Y., Kopiika N., Volynets M., Bobalo T. (2019) Theoretical analysis of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate. 8th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» . November 20-22, 2019, Kharkiv, Ukraine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 708, 1, 012045. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012045> (Scopus Q4) (Blikharskyu Y.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копійка Н.: розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів, виконано компонування статті, редагування; Volynets M.: надання консультацій з методики підсилення; Bobalo T.: запропоновано методику досліджень, виконано теоретичні розрахунки).

2. Bobalo T., Blikharskyu Y., Kopiika N., Volynets M. (2020) Influence of the percentage of reinforcement on the compressive forces loss in pre-stressed RC beams strengthened with a package of steel bars. In International Scientific Conference

EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering, 53-62. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_7 (Scopus Q4, WoS) *(Bobalo T: сформульовано програму експериментальних досліджень, проведено експериментальні випробування; Blikharskyu Y: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копііка N: запропоновано методику експериментальних досліджень і аналізу результатів досліджень, виконано komponування статті; Volynets M.: визначено основну проблему і задачі дослідження).*

3. Bobalo T., Blikharskyu Y., Kopyika N., Volynets M. (2020) Serviceability of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate. In Proceedings of CEE 2019: Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering, 18, 25-33. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_4 (Scopus Q4, WoS) *(Bobalo T: сформульовано програму експериментальних досліджень, проведено експериментальні випробування; Blikharskyu Y: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копііка N: запропонована методика досліджень, виконано komponування статті, розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів ; Volynets M.: визначено основну проблему і задачі дослідження).*

4. Kramarchuk, A., Ilnytskyu, B., Kopyika, N. (2022) Ensuring the Load-Bearing Capacity of Monolithic Reinforced Concrete Slab Damaged by Cracks in the Compressed Zone. In International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering, 217-229. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_21 (Scopus Q4, WoS) *(Kramarchuk A.: сформовано мету досліджень, сформовані висновки, надання фахових консультацій; Ilnytskyu B.: визначено напрям, проблему і задачі досліджень, проведено натурні дослідження; Копііка N.: виконано komponування статті, виконано аналіз результатів досліджень, розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів).*

5. Bobalo T, Blikharskyu Y, Selejdak J, Kopiika N, Blikharskyu Z. (2023) Concrete Beams Reinforced with High Strength Rebar in Combination with External Steel Tape. *Applied Sciences*. 13(7):4528. <https://doi.org/10.3390/app13074528> (Scopus Q2, WoS). *(Bobalo T: визначено напрям і задачі досліджень, проведення експериментальних випробувань; Blikharskyu Y: запропоновано методику досліджень, сформовано аналіз літературних джерел; Selejdak J: визначено проблему досліджень; Kopiika N: виконано компонування статті, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки; Blikharskyu Z: сформовано мету досліджень, сформовано програму досліджень, редагування)*.
6. Blikharskyu Y., Selejdak J., Vashkevych R., Kopiika N., Blikharskyu Z. (2023) Strengthening RC eccentrically loaded columns by CFRP at different levels of initial load. *Engineering Structures*. *Engineering Structures*, 280, 2023 115694. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115694> (Scopus Q1, WoS). *(Blikharskyu Y.: сформовано програму досліджень, проведення експериментальних випробувань; Selejdak J.: сформовано аналіз літературних джерел; Vashkevych R.: визначено проблему досліджень; Kopiika N.: виконано компонування статті, виконано аналіз результатів досліджень; Blikharskyu Z.: сформовано мету досліджень, визначено напрям і задачі досліджень, надання фахових консультацій)*.
7. Blikharskyu Y., Vashkevych R., Kopiika N., Bobalo T., Blikharskyu Z. (2021) Calculation residual strength of reinforced concrete beams with damages, which occurred during loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1021(1), 012012. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012012> (Scopus Q4) *(Blikharskyu Y.: визначено напрям досліджень, проведено теоретичні дослідження; Vashkevych R.: сформовано програму досліджень, виконано перевірку результатів досліджень; Kopiika N.: сформовано мету досліджень, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки; Bobalo T.: сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті; Blikharskyu Z.: визначено проблему і задачі досліджень, редагування, накове консультування)*.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДСИЛЕННЯ ТА РОЗРАХУНКУ ЗГИНАНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	30
1.1. Основні причини і механізми зносу залізобетонних конструкцій, їх вплив на роботу і експлуатаційну придатність	30
1.2. Найбільш поширені і перспективні методи підсилення залізобетонних елементів	36
1.3. Перспективи і особливості використання композитних матеріалів для підсилення пошкоджених залізобетонних елементів.....	40
1.4.Метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) для дослідження напружено- деформованого стану в залізобетонних конструкціях	47
Висновки до розділу 1	61
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	63
2.1. Визначення пріоритетних факторів для дослідження і планування програми досліджень.....	63
2.2. Програма експериментальних досліджень	77
2.3. Методика визначення оптимальних параметрів кореляційного спеклу на досліджуваній поверхні бетону	79
2.4. Методика випробування бетону, побудови повної діаграми деформування з низхідною віткою	83
2.5. Матеріали і конструкція дослідних зразків.....	86
2.6. Методика підсилення залізобетонних балок карбоновими стрічками.....	88
2.7. Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок з використанням суб-мікронних індикаторів.....	90
2.8. Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок з використанням цифрової кореляції зображень	92
2.10. Висновки до розділу 2.	95
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	97

3.1. Результати експериментальних досліджень бетону	97
3.2. Результати експериментальних досліджень залізобетонних балок	99
3.2.1 Критерії вичерпання несучої здатності дослідних зразків залізобетонних балок	99
3.2.1. Несуча здатність і деформативність контрольних зразків (непошкоджених і невідсилених, КБ-0)	101
3.2.2. Несуча здатність і деформативність відсилених зразків без пошкодження (серія 1)	103
3.2.3. Несуча здатність і деформативність зразків з пошкодженнями серій 2-5 ..	108
3.3. Висновки до розділу 3.	132
РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ І ДЕФОРМАТИВНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК	135
4.1. Методика розрахунку несучої здатності залізобетонних балок за деформаційною моделлю	135
4.1.1. Розрахунок напружень і деформацій в залізобетонному перерізі при дії згинальних моментів	135
4.1.2. Розрахунок прогинів і ширини розкриття тріщин	142
4.2. Аналіз результатів розрахунку несучої здатності і деформативності	144
4.3. Аналіз впливу відсилання карбоновою стрічкою на процеси тріщиноутворення	158
4.4. Висновки до розділу 4	166
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	172
ДОДАТКИ	199
ДОДАТОК А. Визначення пріоритетних факторів для дослідження і планування програми досліджень в комплексі Ansys DesignXplorer. Додаткова візуалізація.	199

ДОДАТОК Б. Визначення величини необхідного анкерного закріплення композитної стрічки.....	203
ДОДАТОК В. Вибір регресійної моделі для опису характеристик термічно-зміцненої арматури	205
В.1. Особливості фізико-механічних характеристик термічно-зміцненої арматури	205
В.2. Експериментальна база для розробки регресійної моделі. Оцінка достовірності експериментальних даних серії зразків	207
В.3. Побудова регресійної моделі міцнісних характеристик термічно-зміцненої арматури	211
ДОДАТОК Г. Фотофіксація характеру руйнування залізобетонних балок.....	219
ДОДАТОК Д. Список публікацій за темою дисертації.....	232
ДОДАТОК Є. Апробація результатів дисертаційного дослідження	242
ДОДАТОК Ж. Довідки про впровадження.....	243

ВСТУП

Сучасні будівельні конструкції з залізобетону широко застосовуються в усьому світі завдяки їх високій міцності, довговічності та економічній ефективності. Однак протягом експлуатації залізобетонні елементи можуть зазнавати різних видів пошкоджень, які можуть негативно вплинути на довговічність конструкцій, спричиняючи необхідність в їх підсиленні і реконструкції, що в свою чергу призводить до негативних економічних наслідків. Зокрема, корозія арматурної сталі є однією з основних причин зниження несучої здатності конструкцій. Корозійні процеси в робочій арматурі призводять до зменшення її поперечного перерізу, зниження адгезії між бетоном та арматурою, а також до утворення тріщин та відшарування бетону. Це суттєво впливає на надійність та безпеку конструкцій, особливо в умовах підвищеної агресивності середовища або тривалої експлуатації.

В останні роки активно розвивається застосування сучасних композитних матеріалів у будівництві, що дозволяє не лише продовжити термін експлуатації існуючих споруд, але й значно знизити витрати на їх ремонт та обслуговування. Одним із сучасних методів підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій є використання новітніх високоефективних матеріалів, зокрема карбованих (в інших джерелах, -вуглецевих) композитних стрічок. Карбонові стрічки відомі своїми високими механічними властивостями, малою вагою, стійкістю до агресивних середовищ і легкістю в застосуванні, що робить їх ефективним інструментом для підсилення залізобетонних конструкцій. Необхідно, однак, зазначити, що для оптимального використання композитних матеріалів в підсиленні необхідне детальне вивчення механізмів взаємодії матеріалів, можливих змін в напружено-деформованому стані таких конструкцій та розробки рекомендацій щодо його застосування в різних умовах.

Крім того, для досягнення оптимальної ефективності підсилення необхідне точне виявлення пошкоджень та оцінка деформативності конструкцій, що дозволяє обґрунтовано застосовувати заходи з підсилення. . Сучасні методи цифрової

кореляції зображень (ЦКЗ) дозволяють забезпечувати високоточний, просторово безперервний аналіз деформацій на поверхні елементів у режимі реального часу. На відміну від традиційних точкових вимірювань, ЦКЗ дозволяє фіксувати повне поле деформацій, виявляти локальні аномалії, раннє тріщиноутворення, зміни жорсткості у зонах дії підсилення, тощо. Це забезпечує глибше розуміння механізмів взаємодії залізобетонних конструкцій з композитними міалами підсилення, дозволяє виявити критичні зміни в роботі конструкції ще до досягнення граничного стану і, відповідно, оптимізувати заходи з підсилення.

Актуальність теми дослідження можна засвідчити наступним:

- Залізобетонні конструкції на сьогодні є одними з найбільш поширених як в новому будівництві, так і серед будівель і споруд, що експлуатуються. Тому відновлення несучої здатності пошкоджених залізобетонних конструкцій є надзвичайно актуальним питанням наукових досліджень. В цьому випадку особливої уваги вимагають новітні композитні ремонтні матеріали і системи з унікальними фізико-механічними властивостями. серед них необхідно виділити карбонові стрічки, які і буде розглянуто в цій роботі.
- Метод цифрової кореляції зображень, як один із неруйнівних новітніх методів діагностики конструкцій дозволяє визначати параметри напружено-деформованого стану в локальному об'ємі і отримувати повне поле напружень і деформацій на всіх етапах навантаження. Застосування таких новітніх методик дозволяє значно підвищити достовірність, точність і повноту експериментальних даних для подальшого удосконаленого впровадження цієї інформації в моделі поведінки підсилених пошкоджених залізобетонних конструкцій.
- Застосування спеціалізованого програмного забезпечення для виконання параметричного аналізу конструкції дозволяє побудувати поверхню відгуку, оцінити впливовість окремих параметрів на несучу здатність конструкції, а також відслідкувати кореляційні залежності між окремими параметрами. Таким чином, можна реалізувати пошук оптимального конструкторського рішення, тобто розв'язати основну інженерну задачу при проектуванні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка». Дисертацію виконано в межах державної науково-дослідної роботи «Розробка методики визначення фактичного ресурсу залізобетонних конструкцій з пошкодженнями, що знижують несучу здатність та експлуатаційну придатність» (№ державної реєстрації 0121U109498) в яких здобувачка була виконавицею. НДР виконувалася у Національному університеті «Львівська політехніка» в 2021 - 2022 роках.

Метою роботи є визначення експериментальним і теоретичним шляхом несучої здатності та деформативності залізобетонних балок із різним ступенем пошкодження робочої арматури при підсиленні їх карбоновими стрічками.

Досягнення поставленої мети здійснюється на основі вирішення наступних **задач досліджень**:

- провести огляд літературних джерел і на основі його розробити експериментально-теоретичну програму досліджень залізобетонних балок з пошкодженою арматурою при підсиленні їх карбоновими стрічками, визначення параметрів їх напружено-деформованого стану і тріщиностійкості;
- виконати факторний аналіз з використанням автоматизованого проектування в ПК Ansys для аналізу найбільш впливових факторів при підсиленні залізобетонних конструкцій композитною арматурою;
- вдосконалити методику випробування бетону методом ЦКЗ шляхом оптимізації параметрів кореляційного спеклу;
- вдосконалити методику експериментальних досліджень новітнім методом цифрової кореляції зображень для визначення напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій;
- розробити та апробувати методику підсилення залізобетонних балок із пошкодженою робочою арматурою композитними стрічками із забезпеченням необхідного анкерування;

- експериментальним шляхом оцінити несучу здатність і деформативність залізобетонних балок підсилених карбоновими стрічками при різному пошкодженні робочої арматури;
- розробити та апробувати методику розрахунку за деформаційною моделлю параметрів напружено-деформованого стану для згинаних залізобетонних конструкцій, підсилених карбоновими стрічками, з використанням діючих норм проектування України з врахуванням неоднорідних характеристик термічно-зміцненої арматури.

Об'єкт досліджень – підсилення залізобетонних згинаних конструкцій з пошкодженою робочою арматурою за допомогою карбонових стрічок.

Предмет досліджень – параметри напружено-деформованого стану, міцність і деформативність залізобетонних балок з пошкодженою арматурою, підсилених карбоновими стрічками.

Методи досліджень:

- метод критичного аналізу наявних експериментальних і теоретичних досліджень, що наведені в літературних джерелах;
- механічний метод тензометрії і цифрової кореляції зображень для експериментальних досліджень залізобетонних балок на спеціально підготовленому стенді на базі діючих нормативних документів та з використанням сертифікованого обладнання;
- деформативний метод для теоретичного розрахунку на основі нелінійної деформаційної моделі згідно діючих норм проектування України,
- метод скінченних елементів для факторного аналізу з використанням чисельного моделювання в програмному комплексі Ansys.

Наукова новизна отриманих результатів:

- отримано нові експериментальні дані щодо несучої здатності та деформативності залізобетонних балок, підсилених карбоновими стрічками за різних ступенів пошкодження робочої арматури із застосуванням методу цифрової кореляції зображень;

- встановлено ефективність підсилення залізобетонних балок карбоновими стрічками в залежності від втрати ефективної площі арматури і з врахуванням особливості роботи термічно-зміцненої арматури, що до цього часу не було предметом комплексного аналізу. Це дозволило визначити межі ефективного відновлення несучої здатності балок та обґрунтувати доцільність застосування композитних матеріалів саме в умовах часткової втрати поперечного перерізу арматури;

- оптимізовано параметри кореляційного спеклу при використанні методу ЦКЗ та випробувано різні підходи до підготовки поверхні — із використанням як безпосереднього нанесення спеклу, так і штучних маркерів. Це дозволило підвищити адаптивність методу цифрової кореляції зображень до умов реального навантаження та забезпечити точне безконтактне визначення повного поля деформацій і напружень у бетоні та арматурі на всіх етапах навантаження — аж до руйнування. Розширені технічні можливості методу ЦКЗ створили надійну основу для його впровадження в діагностику пошкоджених залізобетонних конструкцій;

- розроблено та апробовано методику розрахунку за деформаційною моделлю для згинаних залізобетонних балок, підсилених карбоновими стрічками, з урахуванням різних рівнів пошкодження та неоднорідних характеристик термічнозміцненої арматури.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості подальшого застосування для оцінки ефективності підсилення пошкоджених залізобетонних конструкцій із застосуванням карбонових стрічок, розробці оптимальних підходів до застосування композитних матеріалів для відновлення несучої здатності залізобетонних конструкцій, а також використання новітньої методики цифрової кореляції зображень для безконтактного моніторингу технічного стану будівельних конструкцій реальних об'єктів.

Впровадження результатів роботи. Результати дисертаційної роботи використано в навчальному процесі в Національному університеті «Львівська політехніка» при підготовці бакалаврів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна

інженерія» та магістрів спеціалізації «Промислове та цивільне будівництво». Результати експериментально-теоретичних досліджень були впроваджені ТОВ «ЛІГА КОНСТРАКШИН» та ТОВ «СІКА Україна» при обстеженні технічного стану та проектуванні підсилення залізобетонних конструкцій. Деякі матеріали досліджень стали частиною держбюджетної теми 2021-2022 років (№ державної реєстрації 0121U109498). Ефективність результатів підтверджена відповідними довідками та актами впровадження.

Особистим внеском здобувача у роботі є:

- формулювання наукового питання оцінки несучої здатності залізобетонних балок з корозійними пошкодженнями робочої арматури при підсиленні їх карбоновими стрічками;
- проведення експериментально-теоретичних досліджень залізобетонних елементів, підсилених карбоновими стрічками та порівняльний аналіз експериментальних і теоретичних результатів;
- розроблення загальної програми та методики досліджень, а також проведення аналізу наукових праць і нормативних документів, що складають основну базу посилань і цитувань за темою роботи.
- апробація методики розрахунку несучої здатності і деформативності залізобетонних балок з пошкодженою робочою арматурою при підсиленні їх карбоновими стрічками, яка дозволяє враховувати неоднорідні фізико-механічні характеристики термічно-зміцненої робочої арматури з використанням регресійної моделі в формі Больцмана.

Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримано здобувачкою самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: XVII International Scientific Conference Lviv- Košice – Rzeszów «Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv- Košice – Rzeszów» (Rzeszów, Poland, 11-13 вересня, 2019 р.), 8th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Харків, Україна, 20-22 листопада, 2019 р.), VII

Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, Україна, 12-15 травня, 2020 р.), International Scientific Conference EET-2020 «Energy efficiency in transport» (Харків, Україна, 18-20 листопада, 2020 р.), 17th International Conference on Quality Production Improvement-QPI 2023 (Zaborze, Poland, 14-16 червня, 2023 р.), XVIII International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv - Košice – Rzeszów (Rzeszów, Poland, 6-8 вересня, 2023 р.), IV Міжнародній науковій конференції «ЕкоКомфорт та актуальні питання в будівництві» (Львів, Україна, 11-13 вересня 2024 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Структурування та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (Одеса, Україна, 23 квітня 2024 р.), 18th International Conference Quality Production Improvement - QPI 2024 (Osjaków near Wieluń, Poland, 3-5 червня, 2024 р.), International Conference on Urban Infrastructure Sustainable Development and Renovation MistoBud-2025 (Харків, Україна, 30 січня-1 лютого, 2025 р.).

Публікації. Основні наукові результати за темою дисертаційної роботи опубліковані у 25 наукових працях, у тому числі 8 наукових публікацій у спеціалізованих фахових виданнях України і 14 статей у періодичних закордонних виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science та 3 доповідей на наукових міжнародних конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 219 найменувань, 7 додатків. Робота викладена на 245 сторінках, які включають 149 сторінок основного тексту, 15 таблиць та 79 ілюстрацій.

РОЗДІЛ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДСИЛЕННЯ ТА РОЗРАХУНКУ ЗГІНАНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1.1. Основні причини і механізми зносу залізобетонних конструкцій, їх вплив на роботу і експлуатаційну придатність

Об'єкти та системи промислового і цивільного будівництва є критичною інфраструктурою держави і порушення їх безпечної та ефективної роботи може призвести до серйозних негативних наслідків у всіх сферах виробництва, а також у соціальному та економічному житті країни [48,185,77]. Зокрема, залізобетонні конструкції широко застосовуються в сучасному будівництві завдяки їхній високій міцності, довговічності та економічній ефективності [4,5,15,1,189,29]. Однак, під час експлуатації залізобетонні елементи можуть зазнавати різноманітних пошкоджень, що знижує довговічність конструкцій і потребує їхнього підсилення або реконструкції, що, своєю чергою, тягне за собою значні економічні витрати. Термін служби об'єктів і конструкцій із залізобетону залежить від структурної деградації, яка характеризується втратою несучої здатності під впливом фізичних, хімічних, механічних або біологічних факторів [59,45,63].

Вивчення і моделювання деградації конструкцій критичної інфраструктури є необхідними для аналізу життєвого циклу, оцінки надійності та визначення оптимальних стратегій їх обслуговування і експлуатації [138, 136]. Особливої уваги потребують споруди, які зазнають впливу агресивних факторів (таких як високі чи низькі температури, підвищена вологість, корозія, тощо), або піддаються частим екстремальним явищам, наприклад, сейсмічним впливам [181,130,2]. Важливо зазначити, що під час проєктування часто не враховуються зміни технічного стану і специфіка роботи конструкції, що з часом може призводити до суттєвого зниження надійності і зростання витрат на експлуатацію.

Для кращого розуміння процесу накопичення пошкоджень під час експлуатації конструкцій необхідно враховувати, як структурні та фізичні параметри змінюються з часом під впливом зовнішніх чинників [70]. Однією з важливих проблем у моделюванні акумуляції пошкоджень є відсутність чіткого

механізму аналізу з урахуванням невизначеності багатьох факторів [149, 181]. Як зазначають автори в [149], з огляду на зростаючий інтерес до довгострокової надійності і оптимізації вартості життєвого циклу, такі моделі повинні дозволяти прогнозувати надійність конструкцій на тривалу перспективу.

Вичерпання несучої здатності конструкцій можна розглядати за двома типами: раптове руйнування і поступова деградація. Раптове руйнування характеризується різкими змінами властивостей системи під впливом зовнішніх чинників (наприклад, резонансні явища, сейсмічні дії, вибухи тощо). Поступова деградація відбувається протягом усього циклу експлуатації конструкції і полягає у фізичному зношуванні та старінні під дією зовнішніх негативних факторів, таких як корозія, втома матеріалів, тощо [37,36]. Дослідженню впливу пошкоджень і дефектів на поступове зниження несучої здатності конструкцій присвячені роботи багатьох вітчизняних (наприклад Бамбура А. [5,15], Клименко Є. [129,128], Воскобійник О. і Семко О. [12,40,41], Азізов Т. [58,3], Савицький М. [38,131], Ватуля Г. [11,198,199,200,159] та інші) і закордонних авторів [59,181,177, 149,114,159].

Автори в [149] пропонують розглядати загальний процес зношування конструкцій згідно з наступною схемою (див. рис.1.1). Протягом експлуатації в різних часових проміжках ($\{t_n\} = \{t_1, t_2 \dots t_n\}$) конструкція піддається ряду послідовних зовнішніх впливів чи навантажень ($\{S_n\} = \{S_1, S_2 \dots S_n\}$), кожен з яких відповідає певній необхідній несучій здатності ($\{D_n\} = \{D_1, D_2 \dots D_n\}$), де $D_{t_n} = D(x_{t_n}^-, S_{t_n})$, x_t - властивості системи у відповідний проміжок часу, t_n^- - часовий проміжок, що передуює точці t_n . Представимо фактичне значення ресурсу (несучої здатності) у вигляді графіка C_t (див. рис.1.1), що послідовно змінюється в межах проміжків $\{C_{t_{n-1}^-} \dots C_{t_n^+}\}$ і $\{C_{t_n^-} \dots C_{t_n^+}\}$, де t_i^+ це час одразу після t_i . Тоді, вичерпання несучої здатності настане при умові $(C_{t_i} - D_{t_i}) < 0$. Графік на рис.1.1 зображує зміну ресурсу на різних проміжках експлуатації конструкції: t_{n-1}, t_n - моменти раптового надзвичайного впливу на конструкцію, що спричиняє різке зниження несучої здатності, тоді як

плавні проміжки між ними відповідають поступовій деградації при нормальній експлуатації [149].

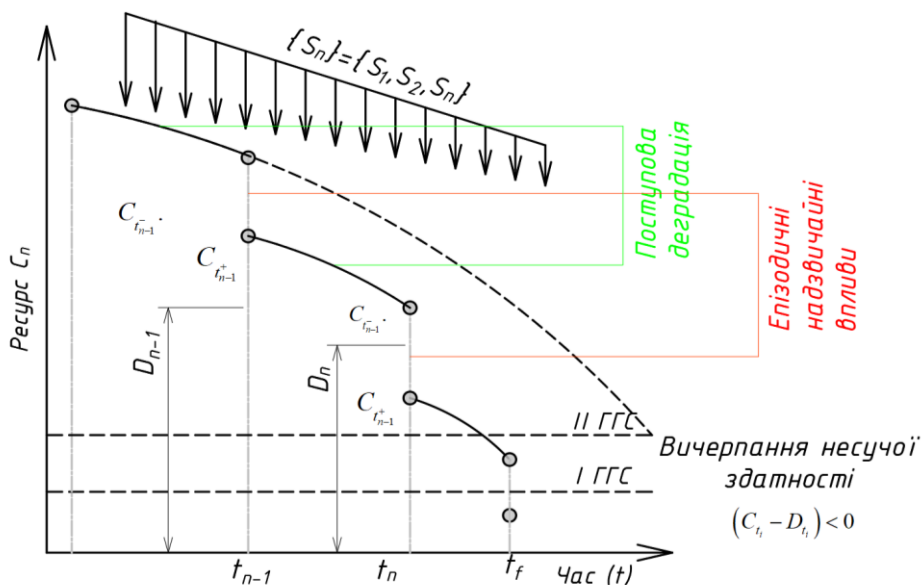


Рис.1.1. Загальна схема зношування конструкції.

Незалежно від механізму руйнування (від зсуву, стиску, підвищених деформацій), загалом можна виділити дві причини: через перевищення навантаженням проектного рівня, чи деградацію конструкції, що спричинила зниження несучої здатності. Основна різниця між ними полягає в тому, що перший випадок передбачає наявність певного рівня навантаження, тоді як другий можливий і при повному розвантаженні конструкції. Для аналізу залишкового ресурсу конструкції як вирішального фактора її надійності необхідно розглядати її як загальну комбінацію раптових і прогресуючих процесів.

Проблема розробки достовірної моделі для оцінки довготривалих процесів деградації конструкції висвітлено в роботі [157]. Як зазначають автори в [59], серед довготривалих процесів особливу увагу необхідно приділяти явищам корозії, втоми, циклічним навантаженням, тощо [34]. Відповідно, ряд робіт було присвячено детальному аналізу, класифікації і вивченню різних груп негативних впливів, що діють на залізобетонні конструкції протягом їх експлуатації [9,32,143]. Загальноприйнятим є поділ негативних зовнішніх впливів на конструкцію за походженням [9]: природні впливи зовнішнього середовища, спричинені

технологічними процесами, аварійні (див. рис.1.2). Протягом технологічних процесів виникають механічні пошкодження конструкцій чи похибки під час зведення, монтажу, транспортування. До технологічних причин належать також відхилення фактичних параметрів від проектних, що виникають ще до початку експлуатації: порушення проектних розмірів, зміщення арматури, неточність в схемах прикладання навантаження, відхилення міцності матеріалів, тощо [9,32,16]. До аварійних раптових впливів, що спричиняють різке зниження параметрів системи належать сейсмічні дії, вибухи, аварії на технологічних лініях, природні катаклізми, тощо [43,33,103,47,44,167].

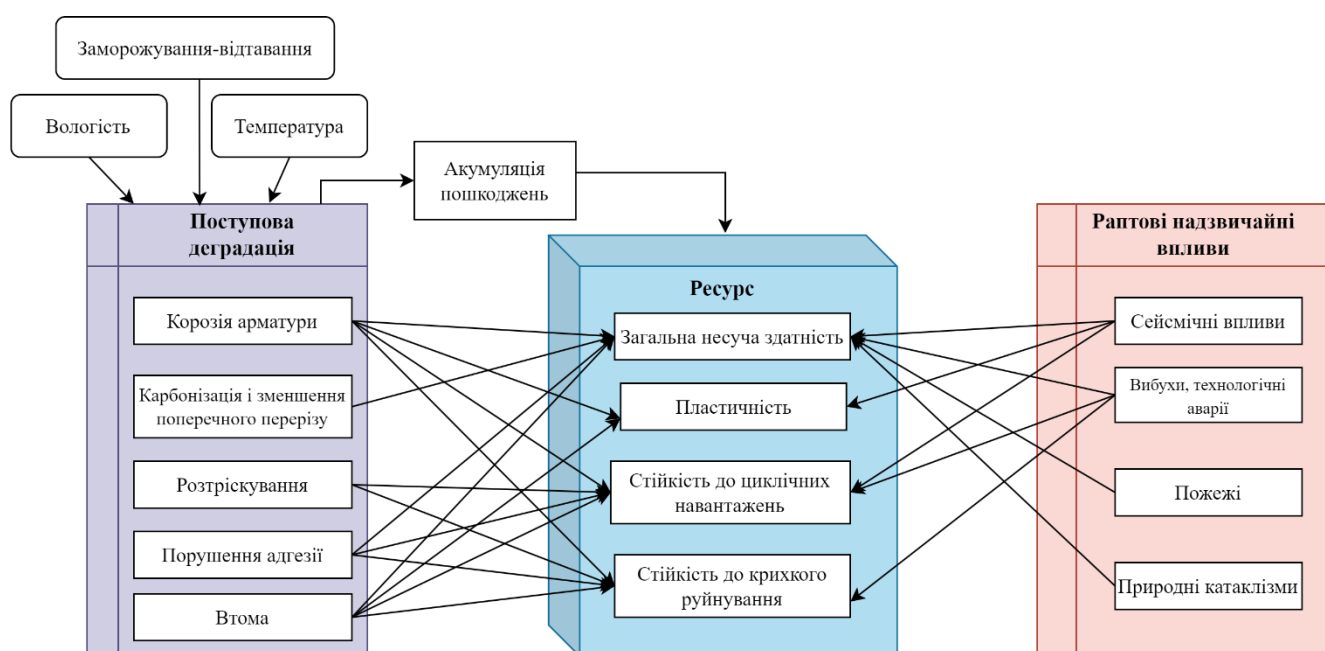


Рис.1.2. Сумісна дія зовнішніх впливів на залишковий ресурс конструкції

Довготривалі зовнішні фактори поступової деградації споруди включають фізичне зношування, впливи температури і вологості, агресивних середовищ, корозії, вогню, втома і зміни у внутрішніх характеристиках системи, спричинені ними: порушення адгезії між арматурою і бетоном [28], зменшення перерізу арматури, втрати попереднього напруження в арматурі [81], пошкодження захисного шару, зниження деформаційних і міцнісних характеристик бетону [114,159]. Зокрема, детально вплив корозійних пошкоджень на залишковий ресурс і надійність залізобетонних конструкцій досліджено в роботах [136,138].

Корозія є однією з найбільш поширених форм деградації арматури та бетону, яка виникає через хімічні процеси, що змінюють їх властивості та спричиняють руйнування [65,67,68,71]. Під час карбонізації вуглекислий газ з атмосфери проникає в капілярні пори бетону і, розчиняючись, утворює карбонатну кислоту. Взаємодіючи з бетоном, ця кислота знижує його лужність, що призводить до руйнування пасивуючого оксидного шару, який захищає арматуру від корозії. Втрата цього шару робить арматуру вразливою до корозійних процесів.

Крім того, бетон часто піддається впливу сульфатів, коли сульфатні іони взаємодіють з його компонентами, утворюючи гіпс та етрінгіт. Ці продукти розширюються, що спричиняє набухання та подальше руйнування бетону [177]. Корозія може бути локальною, створюючи виразки, або рівномірною, що призводить до загального зменшення поперечного перерізу конструкції.

Ще одним важливим фактором деградації є втома матеріалу, яка виникає внаслідок багаторазових циклічних навантажень [34]. Втома може бути зумовлена впливом таких чинників, як висока температура, повзучість та агресивні середовища [59].

Прогресуюча деградація конструкцій є наслідком несприятливих умов навколишнього середовища, таких як висока температура, вологість, карбонізація, проникнення хлоридів, біологічна корозія тощо [143]. Для залізобетонних конструкцій особливу небезпеку становлять зменшення ефективного поперечного перерізу сталевих арматур внаслідок корозії, розтріскування бетону та втрата адгезії між бетоном і арматурою. Сукупність цих чинників підкреслює критичну роль корозії у зниженні несучої здатності конструкцій, що потребує підвищеної уваги до цього процесу [181]. Належний рівень роботи залізобетонних конструкцій забезпечується лише за умови синергічної взаємодії бетону і арматури. У випадку порушення цієї взаємодії підвищується ризик крихкого руйнування конструкції. Порушення адгезії та утворення тріщин у бетоні біля арматурних стержнів призводять до посиленої карбонізації, проникнення хлоридних іонів та вологи, що спричиняє як погіршення властивостей бетону, так і зменшення товщини захисного шару [54].

Як зазначають автори в [181], залізобетонні конструкції є найбільш сприйнятливими до корозії коли перебувають у середовищі з високою концентрацією іонів хлориду або вуглецю. Імпрегнація агресивних часток в масив бетону відбувається через складний комплексний процес, що включає значні фізичні і хімічні модифікації. Крім того, корозійні пошкодження в арматурі розвиваються сумісно з погіршенням сумісної роботи системи арматура-бетон [156]. Корозійні продукти накопичуються в зоні контакту арматури і бетону, спричиняючи внутрішні напруження в бетоні, а подальше їх накопичення, - прискорений розвиток зусиль розтягу, відшарування і розтріскування бетону захисного шару.

Швидкість розвитку корозії та карбонізації існуючих конструкцій залежить від різних порогових значень, які можуть суттєво відрізнятися від стандартних значень, запропонованих для цілей проектування нових конструкцій. Крім того, ці порогові значення залежать від багатьох параметрів як зовнішнього середовища (температура, вологість, ступінь насичення активними іонами), так і характеристик конструкції (структура, клас і тип бетону, захисний шар), тощо [218]. Відповідно, моделі оцінювання і прогнозування довговічності залізобетонних конструкцій повинні включати зміни структурних параметрів під впливом сукупної дії різних зовнішніх впливів [157].

Важливо враховувати сумісний вплив різних типів зовнішніх факторів на механічні характеристики конструкцій. Зокрема, хлоридна корозія негативно впливає на стійкість до циклічних навантажень залізобетонних споруд, знижуючи їхню стійкість до сейсмічних і динамічних впливів. Розвиток корозійних пошкоджень суттєво зменшує здатність споруди поглинати енергію, призводить до зниження пластичності і може спричинити прогресуючу втрату механічного опору бетону [156]. Дослідження [89] також показали, що багаторазові цикли заморожування-відтавання в поєднанні з проникненням хлоридів негативно впливають на сейсмічну стійкість залізобетонних конструкцій, що необхідно враховувати при оцінці сейсмічної стійкості та залишкового ресурсу залізобетонних споруд, що експлуатуються в складних кліматичних умовах.

Подібні результати були отримані в експериментальному дослідженні [179], де вивчався вплив циклів заморожування-відтавання на залізобетонні з'єднання. Виявлено, що такі впливи призводять до значних змін на макро- та мікрорівнях: зниження пластичності, порушення адгезії між бетоном і арматурою, а також до зменшення стійкості конструкцій до динамічних навантажень [179]. Таким чином, усі зовнішні фактори, що спричиняють деградацію конструкцій, слід розглядати в комплексі, з урахуванням їх синергічного впливу (див. рис. 1.2).

Корозія, окремо, призводить до зменшення поперечного перерізу арматури, а втомні напруження – до утворення та поширення тріщин. Однак, їхня спільна дія має ще більш критичні наслідки. Наприклад, виразкова корозія часто викликає появу мікротріщин, а фактори зовнішнього середовища впливають на кінетику їх розвитку. Таким чином, поєднаний вплив корозії та втомних навантажень значно скорочує термін служби залізобетонних конструкцій [59]. Сейсмічні навантаження, у свою чергу, сприяють крихкому руйнуванню, зниженню деформативності, підвищенню ризику пошкодження вузлових з'єднань та зниженню втомної міцності [82,85].

Можна зробити висновок, що механізми деградації залізобетонних конструкцій необхідно розглядати як комплексну проблему, яка залежить від багатьох впливових факторів і аспектів, а також від особливостей кожного конкретної споруди. Хоча корозія арматури визнана основною причиною втрати несучої здатності, наявні підходи до моделювання її наслідків є недостатньо точними, особливо в контексті неоднорідного пошкодження та складних умов експлуатації. Відповідно, незважаючи на значну кількість досліджень в цьому напрямі, наявна потреба у подальшому дослідженні пошкоджених залізобетонних конструкцій.

1.2. Найбільш поширені і перспективні методи підсилення залізобетонних елементів

На сьогоднішній день одним із ключових напрямків оптимізації проектних рішень і максимально ефективного використання наявних будівельних фондів є

підсилення та відновлення залізобетонних конструкцій [13,39]. Однією з актуальних проблем є достовірний аналіз напружено-деформованого стану конструкцій і вибір оптимальної системи підсилення для кожного конкретного випадку [51,144,146]. Причинами необхідності підсилення можуть бути зміни проектних передумов, впливи навколишнього середовища, помилки при спорудженні та інші фактори [145,148,213].

Серед найбільш поширених методів підсилення слід виділити: застосування зовнішніх систем армування, композитних матеріалів, металевих та залізобетонних обойм, тощо [196,6,42,46,78]. Важливо зазначити, що системи зовнішнього армування утворюють принципово нові композитні конструкції, такі як сталобетонні [66]. Сталобетонні конструкції набули широкого використання в будівництві завдяки їх специфічним властивостям і високій ефективності у використанні матеріалів [76,199]. Простота і зрозумілість проектних рішень сприяє широкому застосуванню зовнішніх сталевих стрічок як матеріалу для підсилення [193]. Загалом, підсилення залізобетонних конструкцій із використанням зовнішніх сталевих стрічок або листів включає такі операції: розрізання на потрібні розміри, прикріплення їх до визначених ділянок і анкерування [151,152,206]. Експериментальні дослідження [125] підтверджують доцільність та ефективність цього методу для підсилення залізобетонних балок. Серед переваг використання зовнішніх сталевих стрічок у порівнянні з залізобетонними обоймами можна зазначити зменшення висоти елемента при збереженні необхідної жорсткості та несучої здатності, а також значну економію матеріальних і часових ресурсів.

Важливо враховувати, що застосування різних типів комбінованих систем підсилення змінює напружено-деформований стан конструкцій та механізм їх руйнування. Наприклад, як зазначають автори у [57], використання фібробетону в комбінації зі сталевією стрічкою для армування залізобетонної балки змінює механізм руйнування із зсуву на руйнування внаслідок згину. Подібне спостереження зроблено у дослідженні [182], де поєднання сталевих стрічок та арматури спричинило зміну режиму руйнування на комбінований від зсуву і згину, а також значно підвищило міцність на зсув, пластичність і тріщиностійкість.

Дослідження [99] показало, що використання сталевих стрічок як додаткового поперечного армування знижує інтенсивність тріщиноутворення, а зміни параметрів роботи під втомними навантаженнями описані в роботі [105]. Крім того, важливо відмітити особливий інтерес в дослідженнях до пластичної поведінки залізобетонних балок, підсилених сталевими стрічками [212, 214].

Крім того, часто застосовується зовнішнє додаткове армування сталевими стержнями, як у комбінації зі сталевими листами, так і як окрема система підсилення. При використанні таких підходів важливо звертати увагу на попереднє напруження та співвідношення компонентів додаткового армування і розподіл зусиль що ними сприймаються [75,76].

Під час застосування будь-якої системи підсилення важливо враховувати, що повноцінна робота конструкції можлива лише за умови надійного зчеплення між шарами різних матеріалів [97,203]. Наприклад, як зазначено в [192], для зовнішніх систем підсилення — як композитних, так і сталевих стрічок — вирішальним фактором для забезпечення несучої здатності є достовірна передача зусиль та надійне зчеплення в інтерфазовій зоні. Основним методом для забезпечення сумісної роботи складових конструкції є різні типи анкерування, серед яких найбільш простими є анкери таврового перерізу. Ще більш ефективними є U-подібні анкери, робота яких залежить від їхньої несучої здатності на згин і якості поверхні.

Одним з важливих аспектів роботи конструкцій із зовнішнім підсиленням є те, що, попри значне підвищення несучої здатності, також збільшується деформативність згинаних залізобетонних конструкцій [127, 198]. Для уникнення надмірних деформацій під навантаженням автори [55] пропонують і експериментально підтверджують доцільність попереднього напруження зовнішньої арматури. Дослідження [76] також підкреслює ефективність комбінованих систем підсилення, які забезпечують довговічність, тріщиностійкість і продовження терміну експлуатації залізобетонних конструкцій.

Серед новітніх методів підсилення популярним є використання високоефективного армованого волокном цементного композиту (High-

Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite – HPFRCC) для зміцнення пошкоджених колон [112]. HPFRCC — це фіброцементний композит із дрібними заповнювачами, який характеризується здатністю до згладження деформацій при стиску та розтягу після досягнення пікового навантаження. Проте, основним недоліком цього підходу є порівняно невелике збільшення несучої здатності.

Одним із розповсюджених методів підсилення є використання армованих карбоновим (вуглецевим) волокном полімерів (CFRP), які відрізняються високими показниками міцності та корозійної стійкості [60,122,123]. Наприклад, згідно з даними [111], застосування карбонових стрічок як додаткової поперечної арматури підвищує граничне навантаження і межу текучості залізобетонних конструкцій [201]. Аналогічно, у дослідженні [111,202] проведені циклічні випробування повномасштабних залізобетонних зразків, підсилених стрічками з CFRP (карбонових стрічок), показали збільшення тріщиностійкості, несучої здатності, межі текучості та коефіцієнта пластичності конструкцій завдяки такому підсиленню.

Згідно з [202], ефект композитного підсилення на несучу здатність значною мірою залежить від товщини карбонової стрічки та забезпечення належного зчеплення між старим і новим матеріалом. Як зазначено в [90,176,96], підсилення пошкоджених конструкцій композитними матеріалами є ефективним для зупинки тріщиноутворення під зсувним навантаженням, зменшення прогинів та підвищення міцності на згин. Подібні результати підтверджені такж експериментально [96]. Важливо відзначити, що в ряді випадків композитні матеріали є єдиним можливим способом продовження експлуатаційного ресурсу конструкцій з істотними пошкодженнями. Методика підсилення такими матеріалами, описана в [84], показала високу ефективність для випадків аварійного технічного стану.

Вивчення стану досліджень з проблеми підсилення залізобетонних конструкцій підкреслює важливість розуміння показників міцності та деформативності елементів з різними типами підсилення. Незважаючи на різноманіття існуючих методів підсилення, відсутні комплексні експериментально-теоретичні дослідження, які б дозволили порівняти їхню ефективність при різному

ступені пошкодження арматури. Крім того, більшість методик не враховує специфіку роботи термічно-зміцненої арматури, яка має складну структуру міцності по перерізу. Це обґрунтовує потребу у вдосконаленні підходів до вибору способу підсилення з урахуванням як ступеня пошкодження, так і багатьох інших факторів.

1.3. Перспективи і особливості використання композитних матеріалів для підсилення пошкоджених залізобетонних елементів

Широке використання залізобетонних конструкцій під впливом різноманітних зовнішніх чинників і навантажень викликало значний інтерес в інженерній спільноті до методів продовження їхнього проектного терміну експлуатації, підсилення та відновлення. Один із найбільш поширених і ефективних методів підсилення — застосування композитних неметалевих матеріалів. Завдяки високій міцності, стійкості до хімічної та фізичної корозії, особливим діелектричним і діамagnetним властивостям, а також малій вазі та низькій теплопровідності, композитні матеріали стають все більш популярними [69,133,134,139]. Зокрема, застосування композитних матеріалів для підсилення об'єктів критичної інфраструктури висвітлено в роботі науковців Львівської Політехніки [27].

Композитні матеріали представляють собою комбінацію двох чи більше компонентів, які, поєднуючи свої властивості в єдину систему, утворюють матеріал з характеристиками, що перевищують властивості окремих складових [165]. В інженерній практиці композитні матеріали використовуються у формі тонких смуг з певною орієнтацією волокон (товщиною близько 1 мм), виготовлених методом пултрузії, або гнучких листів і тканин з одно- чи різнонаправленими волокнами, іноді попередньо просочених смолою [195].

Завдяки своїй стійкості до корозії композитні матеріали активно витісняють традиційні методи підсилення у вигляді зовнішнього армування сталевими листами [113]. Основні переваги композитних матеріалів включають високе співвідношення міцності до ваги (коефіцієнт ефективності), довговічність та

варіативність в застосуванні [161]. Крім того, як зазначено в [195], композити спрощують процес підсилення в умовах обмеженого простору, мають широкий діапазон розмірів і геометричних форм, що дозволяє легко адаптувати їх до специфічних вимог конструкції. Такі матеріали характеризуються високою міцністю на розрив (як при короткостроковому навантаженні, так і при довготривалих впливах) та жорсткістю [195].

Серед недоліків композитних матеріалів, які слід враховувати інженерам при прийнятті рішень, є наступні аспекти [195]: на відміну від сталі, яка є пружно-пластичним матеріалом, композити зазвичай мають лінійно пружну поведінку до руйнування і не демонструють властивостей текучості та пластичності. Вартість композитних матеріалів значно вища за сталь, що також потрібно враховувати. Крім того, деякі композити мають коефіцієнти теплового розширення, несумісні з бетоном, і високі температури можуть викликати передчасне руйнування матеріалу. Тому продовження та розвиток практики використання композитів для армування і підсилення бетонних конструкцій вимагають детального вивчення їх функціонування і уточнення нормативних вимог на основі досвіду експлуатації споруд з таким підсиленням [126].

Отже, композитні матеріали не слід розглядати як сліпу заміну інших матеріалів для підсилення і відновлення конструкцій. Їх використання потрібно оцінювати комплексно, з урахуванням усіх переваг і потенційних недоліків. Остаточні рішення щодо їх застосування повинні ґрунтуватися на розгляді багатьох факторів, включно з механічними характеристиками, технологічністю і довговічністю [195].

У будівельній практиці широко використовуються фібро-армовані полімери (Fiber-Reinforced Polymers, FRP). FRP матеріали складаються з високоміцних волокон, занурених у полімерну матрицю. Волокна виконують роль армувальних елементів, а матриця є в'язучою складовою, яка захищає волокна і забезпечує передачу навантаження між ними [165].

Різні комбінації матриць і волокон призводять до створення різних типів FRP матеріалів: CFRP (з карбоновими волокнами), GFRP (зі скляними волокнами),

BFRP (з базальтовими волокнами), AFRP (з арамідними волокнами), і PET (з поліетилентерефталатними волокнами). Залежно від типу волокон, композитні матеріали мають різні фізико-механічні властивості. Механізм руйнування, тріщиноутворення та можливість поглинання енергії також залежать від відсоткового вмісту волокон [154].

Останні удосконалення композитних матеріалів, зокрема їх стійкість до зовнішніх впливів і корозії, призвели до їх широкого використання в підсиленні існуючих будівель і споруд. Наразі накопичено значний досвід практичного застосування композитних матеріалів для продовження експлуатаційного ресурсу залізобетонних конструкцій. Зокрема, композитні системи приклеюються до пошкоджених конструкцій, що перебувають у експлуатації, що не лише підвищує їх несучу здатність, але й покращує жорсткість елементів [166].

FRP-системи у формі стрічок і листів, приклеєних до бетонних поверхонь за допомогою епоксидних клеїв, використовуються для зменшення ризику різних механізмів руйнування вже понад 50 років [79,147]. Зокрема, підвищення несучої здатності на згин досягається за рахунок приклеювання композитних стрічок із повздовжньою орієнтацією волокон до розтягнутої грані залізобетонних згинаних конструкцій [113,139]. Автори в [172] відзначають перспективу заміщення сталевих арматур композитними матеріалами в майбутньому через їх стійкість до корозії, довговічність, малу вагу та зручність у застосуванні. Хоча на початкових етапах вартість конструкцій з композитною арматурою може бути вищою, загалом протягом життєвого циклу вони виявляються економічнішими. Комплексне експериментально-теоретичне дослідження [216] підтверджує ефективність застосування FRP-матеріалів для підвищення жорсткості та несучої здатності на зсув, зменшення ширини тріщин і сповільнення процесів тріщиноутворення. Подібні результати наведені в [124], де підсилення балок CFRP-стрічками в середній зоні підвищує деформативність, здатність поглинати енергію і сповільнює тріщиноутворення. Чисельне моделювання, представлене в [171] свідчить, що використання композитних матеріалів для заміни арматури в розтягнутій зоні дозволяє підвищити тріщиностійкість залізобетонних балок. Детальне

експериментальне дослідження [175] оцінює комбіновані системи підсилення на зсув і згин за допомогою композитних матеріалів, армованих полімерним волокном (FRP) та текстильних армованих розчинів (TRM), підтверджуючи підвищення несучої здатності на зсув і покращення інших параметрів роботи під навантаженням. Схожі результати, представлені в [49], свідчать про значне підвищення несучої здатності на згин і зсув при використанні карбонових стрічок для обгортання залізобетонних балок у комбінації з стержневими анкерами. Детальний огляд літератури в роботі [153] загалом вказує на значні переваги FRP-матеріалів для підвищення несучої здатності під ударними навантаженнями, зокрема сприяє більш пластичній поведінці і зниженню рівня пошкоджень. Позитивний вплив FRP-композитів на несучу здатність конструкцій, що піддаються циклічним навантаженням, висвітлено в ряді робіт [180, 210].

Незважаючи на тривалу практику використання композитних матеріалів, дослідники продовжують зазначати ряд специфічних аспектів, що потребують детальнішого висвітлення.

Як вже зазначено вище, фібро-армовані композитні матеріали загалом мають лінійно пружну поведінку і не демонструють ділянки текучості, на відміну від звичайних конструкційних сталей. Крім того, оскільки модуль пружності цих матеріалів є досить низьким, то при їх використанні для підсилення прогини і розкриття тріщин можуть бути більшими, і їх проектування необхідно проводити, виходячи з граничних станів, що визначаються експлуатаційною придатністю [100]. Автори [160,161] відзначають, що відсутність характерної ділянки текучості у FRP-матеріалів призводить до крихкого механізму руйнування підсилених залізобетонних конструкцій. В своїй роботі [161,113] автори пропонують використання поліетилентерефталатних фібро-армованих стрічок (PET) для уникнення такої небезпеки.

Цікаве спостереження зроблено в роботі [219], де зазначено, що підсилення балок композитними стрічками спричиняє перерозподіл напружень у бетоні та арматурі, що підтверджується як моделюванням методом скінченних елементів (MSE), так і експериментальними випробуваннями.

При підсиленні залізобетонних балок композитними матеріалами недостатньо врахувати лише збільшення несучої здатності балки. Важливо також враховувати стійкість до зсувних зусиль і, при необхідності, підсилювати балку в відповідних зонах [98]. Автори [98] стверджують, що якщо балку не зміцнити огортанням вуглецевими тканинами в зоні максимальних зсувних зусиль, існує небезпека утворення косої тріщини, яка може спричинити миттєве відшарування карбонових стрічок від бетону та крихке руйнування.

Багато практичних і теоретичних досліджень присвячені підвищенню ефективності використання карбонових стрічок. Так, в роботах [163,164] встановлено, що несуча здатність на згин підсилених балок значною мірою залежить від орієнтації стрічок. Зокрема, кут у 45° між повздовжньою віссю балки і напрямком волокон є найбільш ефективним і допомагає уникнути крихкого процесу руйнування. Схожі результати надає теоретичний підхід із застосуванням чисельного моделювання і параметричного аналізу в роботі [208], де проаналізовано різну орієнтацію стрічок і її вплив на несучу здатність і механізм руйнування залізобетонних балок. Впливовим параметром є також відстань між окремими стрічками, якщо вони використовуються для додаткового поперечного армування [50]. Вибір технології підсилення композитними матеріалами визначається очікуваним результатом. Наприклад, приклеювання стрічки до нижньої грані залізобетонної балки сприяє поглинанню енергії та зменшенню прогинів, в той час як застосування діагональних стрічок на боковій поверхні балок і U-подібних систем підвищує несучу здатність на зсув і зменшує деформації сталевих арматур [119].

Однією з найбільш поширених проблем, що виникають при використанні зовнішніх систем підсилення, є порушення сумісної роботи між композитним матеріалом і бетонною поверхнею, що може призвести до відклеювання або порушення анкерування композитної стрічки. Для залізобетонних згинаних конструкцій найбільш небезпечними є зони концентрації напружень на кінцях стрічки, що виникають через зусилля зсуву. Також сумісна робота може порушуватись через появу тріщин на поверхні, що контактує з матеріалом

підсилення, підвищуючи небезпеку відшарування і порушення сумісної роботи. Такий несприятливий механізм руйнування розглядається як третій вид граничного стану в залізобетонних конструкціях і може призвести до неповного використання потенційної несучої здатності CFRP-матеріалів (до 20-30%) [121]. Дослідження [52, 91, 106, 217] також підтверджують, що найбільш типовим і небезпечним механізмом руйнування залізобетонних балок, підсилених CFRP-матеріалами, є відшарування, акцентуючи увагу на критичній необхідності забезпечення ефективної передачі напружень між компонентами системи бетон-композитна стрічка в зоні контакту. Подібний механізм руйнування через порушення зчеплення між композитом і бетоном, а також утворення тріщин на контактних поверхнях, спостерігався і в експериментальних дослідженнях [106]. Крім того, в роботі [117] автори зазначають, що наявність тріщин у залізобетонній балці до її підсилення карбоновими стрічками підвищує ймовірність руйнування через відшарування та знижує ефективність використання композитів.

Відповідно, ряд досліджень присвячено ефективним методам анкерування композитних матеріалів [91,92,116,121,160,209,211]. Наприклад в роботі [211] запропоновано використовувати технологію "поетапного попереднього напруження" ("stepwise prestressing"), що забезпечує само-анкерування CFRP-стрічок з коефіцієнтом їх використання до 81%.

Важливо зазначити, що використання U-подібного поперечного армування в якості анкерів змінює механізм роботи конструкції і знижує ймовірність відшарування FRP-стрічок. Таким чином, при аналогічній витраті матеріалів U-подібні хомути є значно ефективнішими за вертикальні хомути, як зазначено в [209]. Результати дослідження [116] свідчать, що анкери такого типу та підвищений рівень попереднього напруження CFRP-стрічок не тільки підвищують опір навантаженню та пластичність, але й дозволяють ідентифікувати критичні рівні навантаження, близькі до граничних станів. Згідно з комплексною оцінкою і використанням моделі MCE (методу скінчених елементів), такий підхід дозволяє підвищити ступінь використання композитних матеріалів і відкрити нові шляхи їх застосування.

Слід також звернути увагу на роботу [91], в якій пропонується використання прямих анкерів, що є досить ефективними у випадках складної геометрії конструкцій, коли інші способи анкерування є недоступними. Детальне експериментальне дослідження [91] дозволило проаналізувати різні параметри застосування таких анкерів для досягнення максимальної ефективності їх використання. Різні підходи до проектування таких анкерів описані також в роботі, в якій відмічені на перспективні напрямки поглиблення експериментальних і теоретичних знань з цього питання [92].

Схожі результати були отримані шляхом чисельного моделювання залізобетонних конструкцій, підсилених з використанням FRP-анкерів, що дозволило знизити ризик руйнування за третьою групою граничних станів [211]. Згідно з дослідженням [160], кут нахилу анкерів впливає на ефективність їх використання, і найбільш оптимальними є малі значення кутів. Крім того, що анкери усувають небезпеку розшарування, вони також підвищують міцність на зсув і пластичність [160].

Значна кількість досліджень у цій галузі присвячена розробці ефективних методик моделювання і розрахунку для достовірної оцінки напружено-деформованого стану, параметрів роботи та залишкового ресурсу залізобетонних елементів, підсилених композитними матеріалами [53,79,126,166,174,197]. Наприклад, теоретичні дослідження з використанням МСЕ та автоматизованого моделювання, підтвердили ефективність CFRP-матеріалів для підсилення залізобетонних балок із отворами на зовнішніх гранях [53]. Інші автори в своїй статті [79] наголошують на необхідності розробки точних методик розрахунку, які можуть бути адаптовані для практичних потреб і враховують умови експлуатації та напружено-деформований стан конструкції до моменту підсилення композитними матеріалами. У статті [197] представлена аналітична модель для розрахунку міцності на зсув залізобетонних конструкцій, підсилених фібро-армованими композитами, що базується на моделі Мора і враховує неоднорідний розподіл напружень вздовж тріщини. Автори [166] також вказують на доцільність розробки спеціальних МСЕ-моделей, оскільки вони можуть значно знизити

матеріальні і часові витрати на експериментальні дослідження. У своїй роботі [166] дослідники детально описують стратегії та алгоритми для успішного аналітичного моделювання роботи конструкцій, підсилених композитами, що є проектно-орієнтованими та дозволяють параметричний аналіз.

Варто також згадати дослідження [174] сфокусоване на порівнянні різних процедур для оцінки впливових параметрів несучої здатності залізобетонних конструкцій, підсилених композитами. Запропоновано нове спрощене формулювання аналітичної моделі для оцінки несучої здатності на зсув на основі співставлення поперечних зусиль, що сприймаються FRP і сталевую арматурою. Серед останніх вітчизняних досліджень особливо варто відзначити роботу Карпюка та ін. [126], де визначено вплив різних параметрів на несучу здатність балок, підсилених композитними стрічками. Автори [126] представили цілісну кількісну та якісну оцінку деформацій, тріщиноутворення та механізмів руйнування.

Отже, на основі проведеного детального дослідження можна стверджувати, що застосування композитних матеріалів для підсилення і відновлення залізобетонних конструкцій є перспективним напрямком. Попри значний потенціал карбонових стрічок, відсутність стандартизованих рішень щодо їх анкерування і сумісної роботи з пошкодженим бетоном створює ризики передчасного відшарування або втрати ефективності. Додаткові дослідження необхідні для визначення оптимальних параметрів анкерування композиту до пошкодженої конструкції, зокрема в умовах нерівномірного корозійного пошкодження арматури. Ефективне застосування таких матеріалів вимагає детального теоретичного та експериментального аналізу їх впливу на напружено-деформований стан і несучу здатність залізобетонних елементів.

1.4.Метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) для дослідження напружено-деформованого стану в залізобетонних конструкціях

Для ефективного управління ресурсом конструкцій і подовження терміну їх експлуатації необхідно мати точні дані про їх напружено-деформований стан під

дією різних зовнішніх чинників [7,86,142]. Збір таких даних зазвичай потребує масштабних експериментальних досліджень у лабораторних і натурних умовах, що часто є економічно недоцільним. Це зумовлює потребу в більш інтегрованих підходах для комплексного оцінювання технічного стану конструкцій, які, своєю чергою, слугують основою для обґрунтування підсилення, реконструкції або продовження строку служби споруд [86]. В інженерній практиці чітко простежується перехід від традиційного планового контролю до прогнозного моніторингу, що базується на параметрах, виявлених за допомогою неруйнівних методів дослідження реальних конструкцій [168]. Для цього необхідно отримувати високоточну інформацію про напружено-деформований стан на всіх стадіях навантаження, що є складним завданням при використанні класичних методів. У цьому контексті дедалі ширше застосовується метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ, або Digital Image Correlation, DIC) [61,62,64]. Цей метод відноситься до класу безконтактних методів і базується на отриманні зображень фізичного об'єкта дослідження, збереженні їх у цифровій формі та подальшому аналізі для отримання інформації про напружено-деформований стан конструкції [140,183,31] (див рис. 1.3).

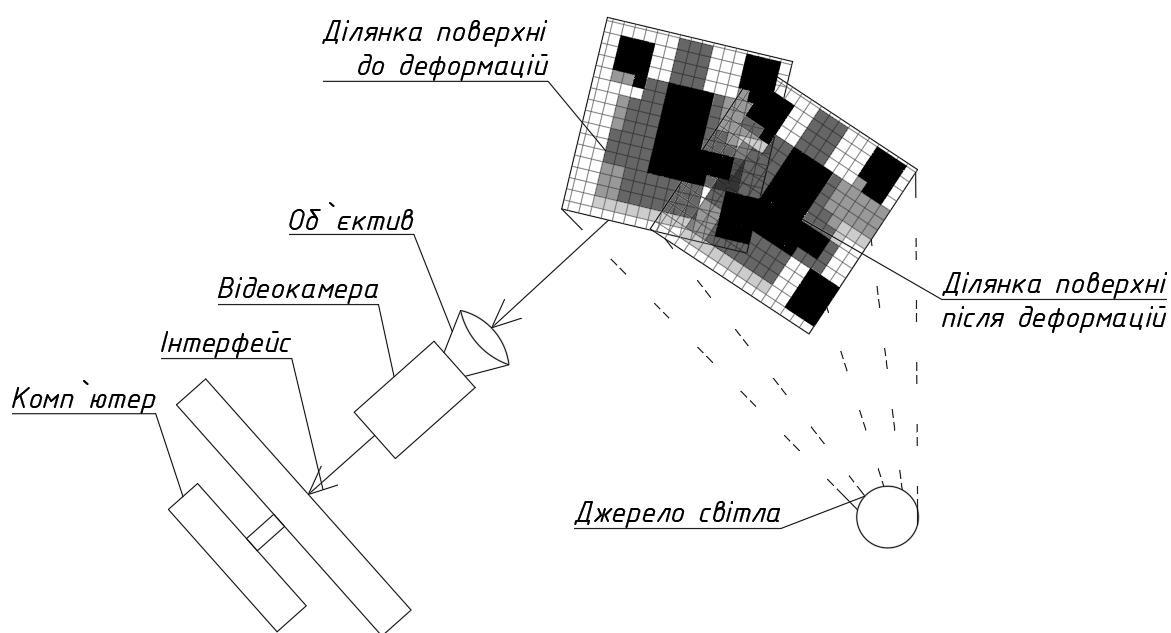


Рис. 1.3. Схема реєстрації зображень із застосуванням методу ЦКЗ

Аналіз даних полягає у порівнянні еталонного зображення поверхні до навантаження (reference image, RI) із деформованими зображеннями, що відповідають різним етапам навантаження (deformed images, DI) [23]. Серед найбільш поширених програмних комплексів, що забезпечують автоматизоване опрацювання зображень, можна виділити Vic-2D/3D (Correlated Solutions, Inc., [204]), StrainMaster (LaVision, [190]), GOM Correlate Pro, ARAMIS (GOM, [107]), Solid Mechanics DIC (Dantec Dynamics, [187]), та інші.

Вимірювання деформацій при застосуванні методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) здійснюється за допомогою стохастичного контрастного візерунка з точок, який попередньо наносять на досліджувану ділянку (спекла або патерну [168]). Оскільки окреме число не є унікальним у матриці, доцільно розглянути підмножину сусідніх чисел (окіл точок або пікселів). Зазвичай така підмножина має форму квадрата зі стороною від 10 до 50 пікселів і, завдяки включенню кількох точок з різною варіацією рівня сірого, представляє собою набір відмінних кореляційних областей (див. рис. 1.4). Центр кожної такої ділянки вважається точкою вимірювання. Для кожної ділянки відслідковується її положення і визначаються координати на послідовно отриманих зображеннях.

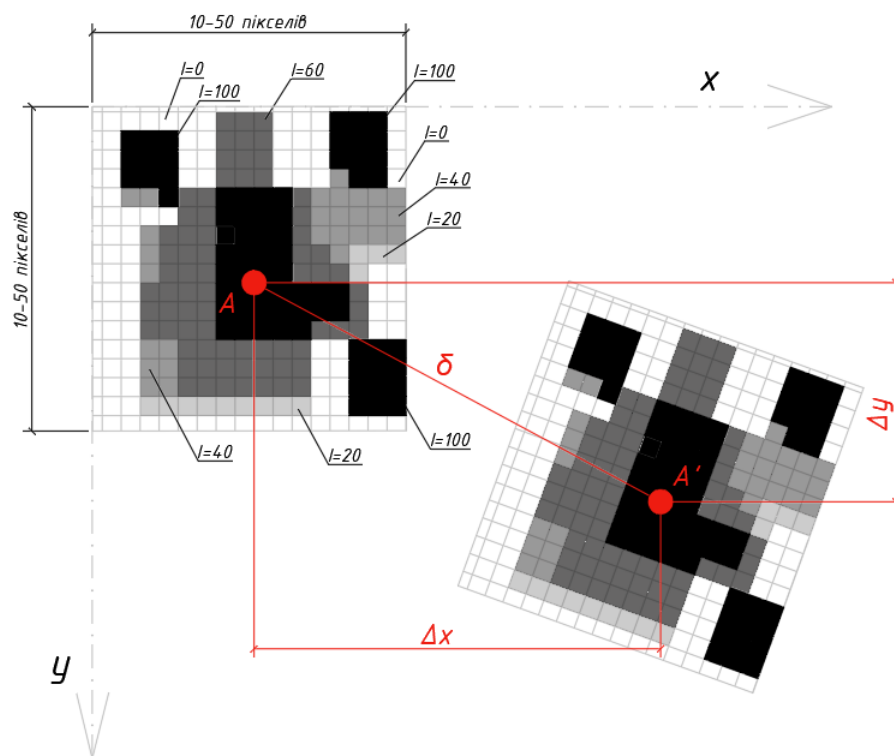


Рис.1.4. Принцип відслідковування відносного положення ділянки з різною варіацією рівня сірого (I) в методі ЦКЗ.

Основний принцип методу ЦКЗ полягає у порівнянні положення фізичної точки на еталонному зображенні з її розташуванням на зображеннях деформованої поверхні [168,24]. Як показано на схемі (рис. 1.3), навколо конкретного пікселя можна виділити ділянку довільної форми, в межах якої розподіл відтінків буде унікальним (спекл). Далі, за певним алгоритмом і за допомогою відповідного програмного забезпечення, шукається ділянка з таким самим розподілом відтінків пікселів. Під час кореляції підмножини чисел зміщуються, поки візерунок на деформованому зображенні найкраще відповідає еталонному. Це визначається за сумарною різницею в рівнях сірого кожної точки [24].

Чисельний підхід полягає в тому, що спекл-зображення поверхні можна описати функцією $r(x,y)$ і розкласти її на окремі фрагменти, - $r_{m,n}$ (див. рис.1.5).

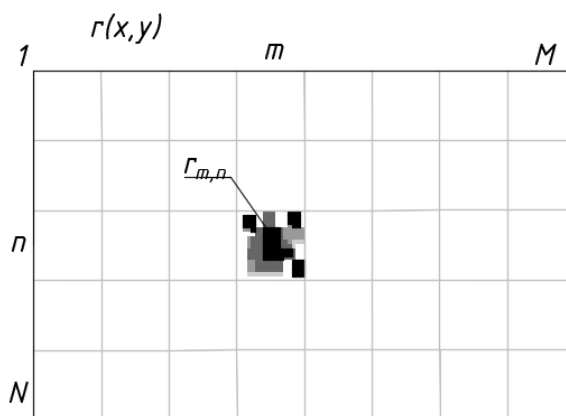


Рис.1.5. Розклад ділянки $r(x,y)$ на фрагменти $r_{m,n}$

Зображення, що відповідає вихідній і деформованій поверхні, опишемо функціями $r(x,y)$ і $S(x,y)$, відповідно, які, в свою чергу, розкладаються на матриці розмірності $M \times N$ виду $r_{m,n}(x,y)$ і $S_{m,n}(x,y)$, де $m=1 \dots M$, $n=1 \dots N$. В піксельному вираженні розмірність фрагментів зазвичай складає 8×8 , 16×16 , 32×32 , 64×64 пікселя. Очевидно, що фрагмент спекл-зображення поверхні на певному етапі навантаження $S_{m,n}(x,y)$ є частиною відповідного фрагмента $r_{m,n}(x,y)$ вихідного спекл-зображення, що спотворене шумами і завадами (див. рис.1.6).

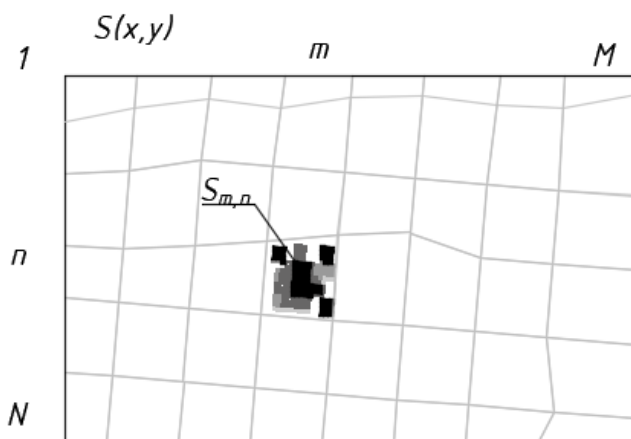


Рис. 1.6. Визначення деформованого фрагмента $S_{m,n}$, що відповідає вихідному $r_{m,n}$

Зміщення фрагмента $S_{m,n}(x,y)$ відносно $r_{m,n}(x,y)$ визначається формулою:

$$\Delta l = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}, \quad (1.1)$$

де $\Delta x, \Delta y$ - різниця відповідних координат.

Таким чином, фрагмент $S_{m,n}(x,y)$ описується наступним рівнянням:

$$S_{m,n}(x,y) = \bar{r}_{m,n}(x+\Delta x, y+\Delta y) = r_{m,n}(x+\Delta x, y+\Delta y) \cdot m_{m,n}(x,y) + n_{m,n}(x,y), (1.2)$$

де $m_{m,n}(x,y)$ - мультиплікативний шум,

$n_{m,n}(x,y)$ - адитивний шум.

Тоді величину зміщення опишемо з використанням операції крос-кореляції [83, 207, 191]:

$$\bar{C}_{m,n}(\Delta x, \Delta y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r_{m,n}(x,y) \cdot \tilde{r}_{m,n}(x+\Delta x, y+\Delta y) + \Delta y \cdot dx \cdot dy, (1.3)$$

Рівняння (1.3) дозволяє визначити положення крос-кореляційного піку, за максимум якого знаходимо положення зміщеного фрагмента відносно вихідного. Крос-кореляція 2-х фрагментів матиме наступний вигляд:

$$r_{m,n}(x,y) = \bar{r}_{m,n}(x,y) + g_{m,n}(x,y), (1.4)$$

$$S_{m,n}(x,y) = r'_{m,n}(x+\Delta x, y+\Delta y) \cdot m'(x,y) + n'(x,y) + f_{m,n}(x,y), (1.5)$$

де $\bar{r}_{m,n}(x,y)$ - спільна частина фрагментів; $m'(x,y), n'(x,y)$ - відповідно, мультиплікативний і адитивний шуми у зсунутому суб-фрагменті $r'_{m,n}(x+\Delta x, y+\Delta y)$, $g_{m,n}(x,y)$ - частина вихідного фрагмента $r_{m,n}$, $f_{m,n}(x,y)$ - частина вихідного фрагмента $S_{m,n}$. Зміщення фрагментів і суб-фрагментів спекл-картин на досліджуваній поверхні наведено на рис. 1.7.

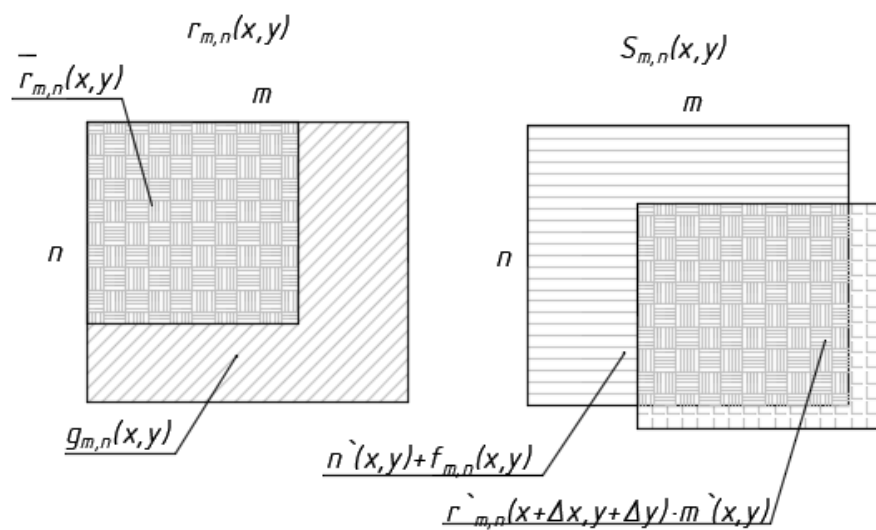


Рис. 1.7. Зміщення фрагментів і суб-фрагментів спекл-картин на досліджуваній поверхні

Тоді опишемо крос-кореляцію функцій, що описують вихідний і деформований фрагменти наступним чином:

$$C_{m,n}(\Delta x, \Delta y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r_{m,n}(x, y) \cdot S_{m,n}^*(x + \Delta x, y + \Delta y) \cdot dx \cdot dy, \quad (1.6)$$

де символ «*» виражає комплексно спряжену функцію.

Якщо врахувати, що m, n -ний кореляційний пік вихідного фрагмента $r_{m,n}(x, y)$ зміщується при деформуванні на відстань $\Delta l_{m,n}$ (згідно з формулою 1.1), то ця величина також опише зміщення фрагмента $S_{m,n}(x, y)$ відносно вихідного $r_{m,n}(x, y)$.

Цифрові обчислення можна виконати із використанням дискретного виразу виду [207, 186]:

$$C_{m,n}(k, l) = \sum_i \sum_j \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r_{m,n}(i, j) \cdot S_{m,n}^*(i + k, j + l), \quad (1.7)$$

де $i=1 \dots I, j=1 \dots J$ -відлік аргументів для функцій $r_{m,n}(x, y)$ і $S_{m,n}(x, y)$, відповідно, $k=1 \dots K, l=1 \dots L$ -те саме для крос-кореляційної функції $C_{m,n}$. За допомогою останньої формули маємо можливість ідентифікувати знаходження кореляційного піка із достатньою точністю на суб-піксельному рівні. Загалом, крос-кореляційну функцію можна визначити з використанням формули [94]:

$$C_{m,n}(k, l) = F_d^{-1} [C_{m,n}(p, g)] = F_d^{-1} \{R_{m,n}(p, g) + S_{m,n}^*(i + k, j + l)\}. \quad (1.8)$$

У вище наведеній формулі прийнято наступні позначення: $R_{m,n}(p, g) = F_d \{r_{m,n}(i, j)\}; S_{m,n}(p, g) = F_d \{S_{m,n}(i, j)\}$, F_d, F_d^{-1} – оператори прямого і зворотного дискретного двовимірного перетворення Фур'є. У області Фур'є $I=J=K=L=P=Q$ приймаємо відліки функції $R_{m,n}, p=1 \dots P, q=1 \dots Q$.

Зміщену функцію $\{C_{m,n}\}_{shift}$ запишемо з використанням теореми Фур'є і алгоритму Сьодаля-Бенкерта згідно [110, 120] у вигляді:

$$C_{m,n}(k, l) \{C_{m,n}\}_{shift} = F_d^{-1} \left\{ C_{m,n}(p, g) \exp \left[-\frac{2\pi(a_x p + a_y g)}{P} \right] \right\}, \quad (1.9)$$

де a_x, a_y -дробові значення переміщень.

Переміщення фрагмента опишемо за допомогою 2-х координат у перпендикулярних напрямках :

$$\Delta x = k + a_x, \quad (1.10)$$

$$\Delta y = l + a_y, \quad (1.11)$$

де k, l - відліки крос-кореляційної функції $C_{m,n}$ для цих напрямків.

Поширеним підходом для отримання більш точних результатів є застосування фільтру дробового ступеня, що дозволяє звужити кореляційний пік. Остаточна формула приймає вигляд:

$$C_{m,n}(k,l) = F_d^{-1} \left\{ \frac{[R_{m,n}(p,g)S_{m,n}^*(p,g)]}{[R_{m,n}(p,g)S_{m,n}^*(p,g)]^{t/2}} \right\}, \quad (1.12)$$

де t позначає параметр фільтра з дійсним значенням.

При цьому важливо врахувати погіршення вихідного сигналу і зниження точності визначення положення піку. Приклад співставлення матриць кореляційних піків наведено на рис. 1.8.

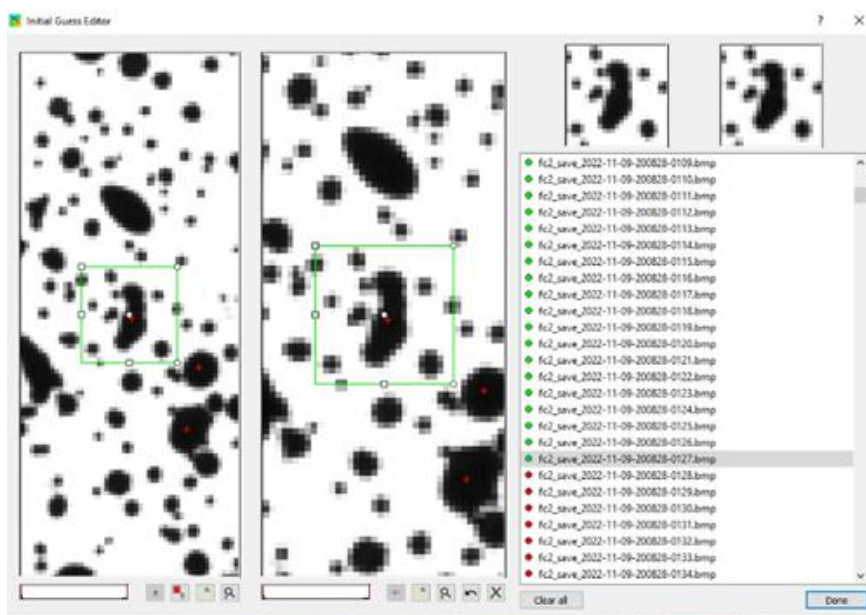


Рис. 1.8. Приклад по-фрагментного співставлення крос-кореляційних піків на досліджуваній поверхні

Переміщення кореляційних піків можна описати в матричній формі:

$$\overline{\Delta l}_{m,n} = (\Delta x)\bar{i} + (\Delta y)\bar{j}, \quad (1.13)$$

де $\bar{i}, \bar{j}$ - одиничні напрямні вектори, що використовуються для опису векторі переміщень $\bar{\Delta l}_{m,n}$.

Аналогічно в матричній формі визначаються вектор деформацій:

$$\bar{\Delta \varepsilon}_{m,n} = \frac{\Delta x_{m,n}}{b_x} \bar{i} + \frac{\Delta y_{m,n}}{b_y} \bar{j}, \quad (1.14)$$

де $\Delta x_{m,n}, \Delta y_{m,n}$ - зміщення максимуму кореляційного піка у відповідних напрямках; b_x, b_y використано для позначення мінімальних баз для визначення деформацій, що дорівнюють відстаням між центрами вихідних фрагментів. Для того щоб матриці векторів деформацій описувались двовимірними значеннями доцільно приймати $b_x = b_y$.

При застосуванні методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) параметри точкового візерунку (спеклу) є одним із ключових факторів, що дозволяють зменшити загальну похибку вимірювання і покращити точність результатів [115]. Основні вимоги до візерунку, нанесеного на поверхню, наведені в [188,87], включають: високу контрастність, ступінь покриття поверхні візерунком на 50-70%, ізотропність та випадковий характер розподілу точок.

Серед основних параметрів лабораторної установки слід виділити такі (див. рис. 1.9): роздільна здатність камери ($c \times r$, пікселів), ширина (w , мм) і висота (h , мм) досліджуваної ділянки, фокусна відстань камери (f , мм) та відстань від камери до зразка (d , мм).

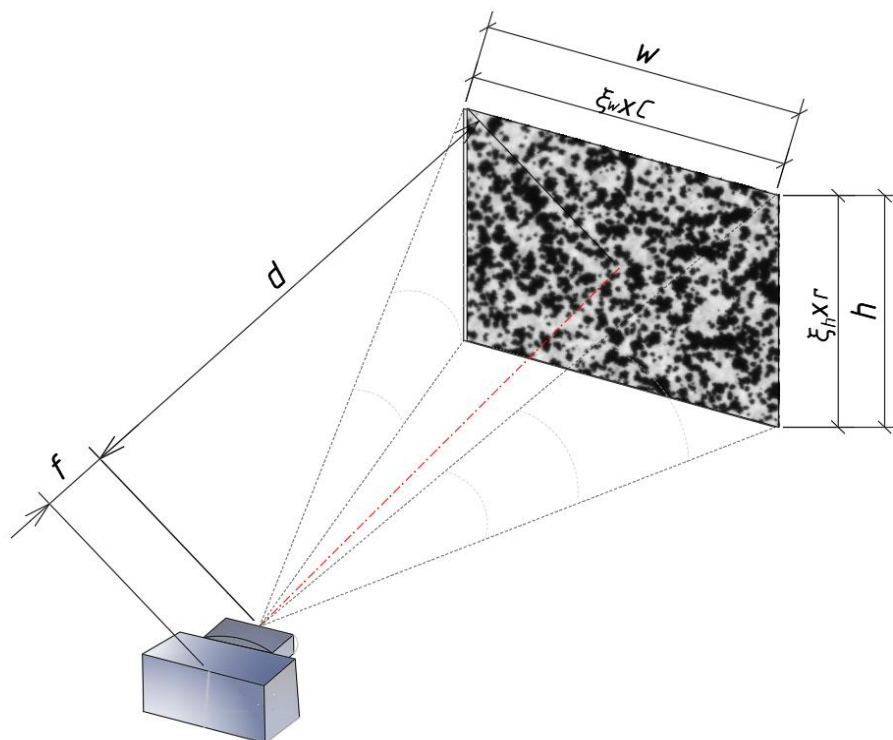


Рис.1.9. Принципова схема вимірювання при застосуванні методики цифрової кореляції зображень

Фокусна відстань є змінним параметром, який дозволяє регулювати відстань до об'єкта і підвищувати чіткість зображення досліджуваної ділянки. Роздільна здатність ($c \times r$) є технічною характеристикою цифрової камери і визначає розміри цифрового зображення (кількість стовпців і рядків). З використанням встановлених значень $c \times r$ та розмірів досліджуваної ділянки ($h \times w$) можна визначити розмір фізичної поверхні, що відображається одним пікселем цифрового зображення [87]:

$$\xi_w = \frac{w}{c}, \quad (1.15)$$

$$\xi_h = \frac{h}{r}. \quad (1.16)$$

Величини ξ_w , ξ_h визначають ширину і висоту ділянки фізичної поверхні, яка відповідає одному пікселю цифрового зображення і приймаються однаковими ($\xi = \xi_w = \xi_h$). Необхідно зазначити, що, оскільки в більшості сучасних цифрових камерах застосовано співвідношення $c \times r = 4 \times 3$ (3×2), то максимальне використання піксельного зображення досягається лише при $h / w = 1.33$. Шляхом

зміни технічних параметрів камери, або розмірів досліджуваної ділянки можна регулювати ці значення і оптимізувати параметри експерименту, максимізуючи кількість використаних пікселів.

Тоді, задаючись певним розміром крапок в цифровому вираженні a (пікселі) маємо можливість визначити оптимальний розмір крапок, які складають візерунок на фізичній досліджуваній поверхні:

$$d = a \cdot \xi. \quad (1.17)$$

Оптимальна величина a залежить від параметрів конкретної інженерної задачі і може перебувати в широкому діапазоні значень. В офіційних посібниках від розробника програмного забезпечення рекомендоване застосування крапок розміром не менше за 5 пікселів [188]. Автори [87] рекомендують використання випадково сформованого візерунка з крапками розміром 10, 20 і 30 пікселів. Значний вплив на практичну можливість отримання бажаного візерунку мають способи його нанесення на досліджувану поверхню. Найбільш поширені методи включають використання штампів, аерозолів, друку, а також новітні технології: літографію, УФ-фотолітографію та лазерне маркування [80].

Для оцінки якості нанесеного візерунку та його відповідності конкретній задачі існує ряд методів, заснованих на аналізі ентропії та розподілу інтенсивності окремих ділянок спекла, морфологічному аналізі візерунку. Основним параметром для оцінки рекомендується використовувати середній градієнт інтенсивності [115]. Ще одним важливим аспектом є вибір оптимальної бази для вимірювання деформацій. Для дослідження пошкоджених конструкцій і тріщиностійкості матеріалів необхідно використовувати бази оптимальних розмірів, які забезпечують інваріантність результатів вимірювання до геометрії зразка і навантаження. Малі бази можуть призвести до значних статистичних розкидів результатів, тоді як великі бази не дозволяють точно визначити області максимальних деформацій на поверхні елемента конструкції [35, 22, 24].

Здатність відслідковувати параметри напружено-деформованого стану до стадії фактичного руйнування з високою точністю та безконтактний характер

методів ЦКЗ (цифрової кореляції зображень) сприяють зростанню зацікавленості до дослідження тріщиностійкості за допомогою цієї технології [158,169,215]. Традиційні методи для моніторингу розвитку тріщин потребують безпосереднього доступу до конструкції, що часто вимагає зупинки експерименту або порушує правила техніки безпеки. В протиполог цьому, ЦКЗ передбачає лише автоматизований запис зображень досліджуваної зони з певної відстані, що забезпечує цілісність і неперервність експериментальних даних та безпеку для дослідника [150]. Прикладом реалізації цієї технології на реальних об'єктах є дослідження параметрів напружено-деформованого стану б'єду мостових конструкцій в світі [135], зокрема і при аналізі ефективності підсилення Макленбурзького моста в Північній Кароліні [95]. Важливо також відзначити, що розриви в полях деформацій на поверхні конструкції є ознакою початку тріщиноутворення, що в свою чергу свідчить про порушення нормального режиму експлуатації споруди [88,170]. У цьому контексті кореляція зображень є ефективним способом мінімізації обсягів ручних технічних обстежень для оптимальної оцінки залишкового ресурсу споруд, що знаходяться в експлуатації.

Як зазначено в ряді досліджень [104], точність визначення напружень і розмірів дефектів є критично важливою для задач тріщиностійкості. Наприклад, у дослідженні [158] за допомогою повного поля деформацій, отриманого методом ЦКЗ, було проаналізовано поширення тріщин при різних рівнях навантаження та оцінено ефективність композитного підсилення для покращення тріщиностійкості залізобетонних конструкцій. Прогресивні результати, що стосуються змін у характері тріщиноутворення залежно від способу і швидкості навантаження, були отримані в дослідженні [170], що підтверджує перспективність застосування ЦКЗ для оцінки механізмів руйнування в залізобетонних конструкціях.

Процеси тріщиноутворення доцільно розглядати в локальному режимі з урахуванням мікро- і макро-структурних особливостей матеріалу, як зазначено в роботах [173,170], оскільки різноманітні включення, межі зерен і дефекти можуть бути концентраторами напружень і локалізаторами пластичних деформацій. Таким чином, зони з гетерогенним характером деформацій можуть виступати як

індикатори зародження тріщин і незворотних процесів руйнування. У цьому контексті ЦКЗ є практично єдиним методом, який забезпечує необхідну точність для виявлення раннього накопичення пошкоджень перед зародженням тріщин та для детального вивчення стадії їх поширення [173,170]. Наприклад, в дослідженні [162,170], розподіл деформацій, отриманий за допомогою ЦКЗ, використовується для ідентифікації тріщин, оскільки в зонах тріщиноутворення деформації значно збільшуються. Відмічено також, що орієнтація і напрямок росту тріщин зазвичай відповідають напрямкам головних напружень в матеріалі [162,170]. Також в роботі [155] реалізовано підхід на основі 2D-ЦКЗ, що передбачає аналіз локальних деформацій в околі вершини тріщини і їх розкладу на механічні складові. Також в роботі [155] відмічено ефективність побудови 3D-полів переміщень за алгоритмом стерео-кореляції для спостереження за змінами коефіцієнтів інтенсивності напружень для різних механізмів тріщиноутворення. Дані, отримані ЦКЗ дозволяють також відстежувати процеси неоднорідного розкриття і закриття тріщин, швидкість їх росту і відповідні поля напружень, як зазначено в роботі [108].

Окремо слід виділити методику 3D-кореляції зображень, яка дозволяє отримувати повну картину деформацій у тривимірних координатах та аналізувати параметри напружено-деформованого стану під час динамічних навантажень [109]. Принцип цієї методики полягає у тривимірному описі досліджуваної ділянки на основі зображень, отриманих з двох різних точок зйомки. Це дозволяє не тільки визначити деформації у всіх трьох просторових напрямках, але й оцінити їх зміни під час навантаження [194]. Нехай певна точка A має координати в дійсній просторовій системі координат $O_w X_w Y_w Z_w$, тоді лівій і правій камерам відповідатимуть системи координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ і $O_2 X_2 Y_2 Z_2$, відповідно, а координатна система зображення буде OXY (див. рис. 1.5). Точки $A_1(x_1, y_1)$ і $A_2(x_2, y_2)$ отримаємо в результаті знімання лівою і правою камерами, відповідно дійсної точки $A(x_w, y_w, z_w)$ об'єкта в просторі. Якщо виконане калібрування камер і відома схема їх розміщення, то шляхом триангуляції можна визначити 3D-координати точки A . В цьому випадку процес співставлення еталонного зображення (RI) з

деформованим (DI) наступний: співставляються DI з RI з лівої камери, і, одночасно з тим, проводять співставлення DI з правої і лівої камер [194]. Схема наведена на рис. 1.5. Важливо зазначити, що додаткова синхронізація та узгодження параметрів і кореляційних функцій у часі, калібрування систем зображень і додаткові етапи триангуляції вводять новий рівень складності та збільшують вартість експериментальної установки. При цьому, неточності в синхронізації оптичних систем у 3D-ЦКЗ можуть спричиняти значні помилки в виміряних даних [109].

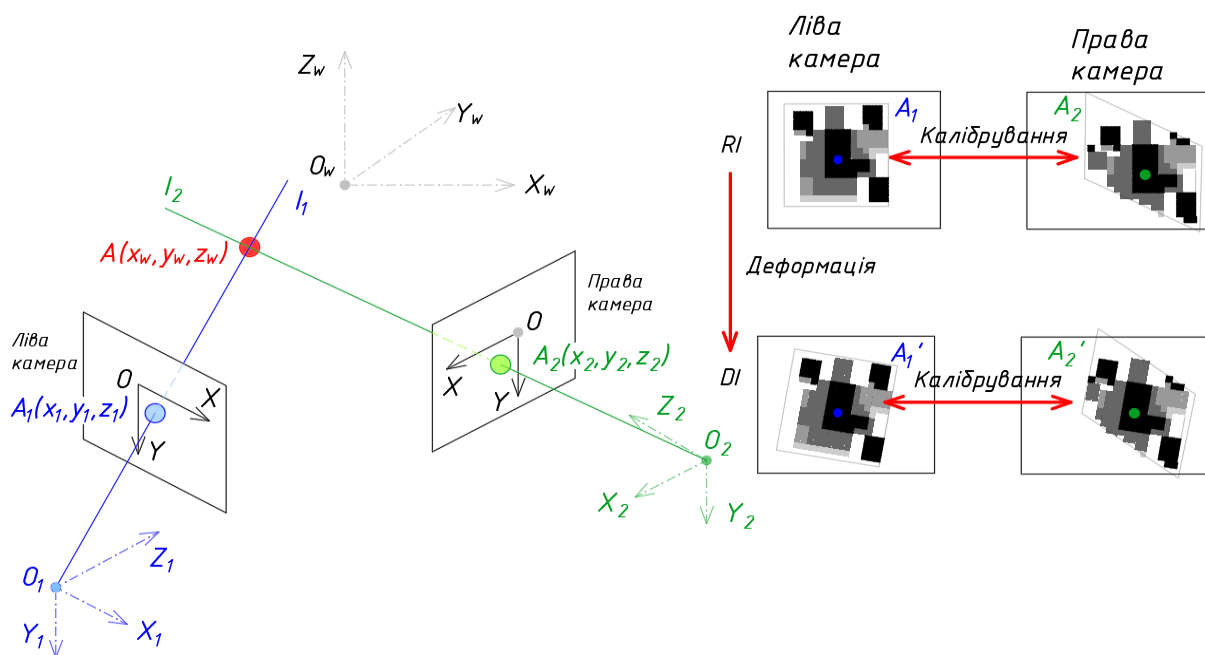


Рис.1.10. Принципова схема вимірювання і співставлення даних при застосуванні 3D-ЦКЗ

Результати порівняльного аналізу показують, що дані про напружено-деформований стан, отримані за допомогою ЦКЗ, добре корелюються з результатами інших експериментальних методів, таких як акустична емісія, термopужний аналіз, тензодатчики та теоретичної оцінки з використанням методів скінченно-елементного аналізу [30,104,170,108,95].

Цифрова кореляція зображень є перспективним інструментом, проте її застосування до повнорозмірних залізобетонних елементів із складним армуванням залишається малодослідженим. Бракує методичних напрацювань щодо поєднання ЦКЗ з іншими вимірювальними технологіями для надійного і

відтворюваного оцінювання деформацій у зонах локального пошкодження. Це зумовлює потребу у розробці адаптованих методик, які б дозволили повною мірою реалізувати потенціал ЦКЗ у задачах підсилення.

Висновки до розділу 1

На основі ретельного аналізу вітчизняних і закордонних джерел можна зробити такі висновки:

1. Залізобетонні конструкції під час експлуатації можуть зазнавати різних пошкоджень, які знижують їхню довговічність і потребують підсилення чи реконструкції, що призводить до значних витрат. Основною причиною зниження несучої здатності є корозія арматурної сталі, що веде до зменшення її поперечного перерізу, погіршення адгезії з бетоном і утворення тріщин. Це негативно впливає на надійність конструкцій, особливо в агресивних середовищах. Оптимальне і безпечне використання наявних будівельних конструкцій є критично важливим для запобігання серйозних наслідків.
2. В останні роки активно використовуються композитні матеріали, які не лише подовжують термін служби конструкцій, але також є технологічно адаптивними і зручними при виконанні ремонтних робіт. Одним з таких матеріалів є карбонові композитні стрічки, які мають високу міцність, легкість і стійкість до агресивних умов. Проте, попри широку апробацію, залишаються невирішеними питання взаємодії композитів із пошкодженим бетоном, зокрема в частині сумісної роботи та анкерування стрічок. Відсутність уніфікованих методичних рішень створює ризики втрати ефективності підсилення та передчасного руйнування. Це вимагає подальшого комплексного аналізу, спрямованого на визначення оптимальних параметрів застосування композитів у випадках нерівномірного чи локалізованого пошкодження арматури.
3. Сучасні методи цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) дозволяють проводити точний моніторинг стану конструкцій, оцінюючи деформації та пошкодження в режимі реального часу. Інтеграція ЦКЗ у процес моніторингу залізобетонних конструкцій підвищує ефективність підсилення завдяки підвищенню точності

діагностики напружено-деформованого стану і оперативному виявленню критичних змін. Водночас слід підкреслити, що практичне використання ЦКЗ для повнорозмірних залізобетонних елементів зі складним армуванням наразі залишається обмеженим. Бракує методик поєднання ЦКЗ з іншими вимірювальними технологіями для отримання відтворюваних результатів, особливо у зонах локальних пошкоджень, що підсилюються композитами. Це зумовлює необхідність розробки адаптованих експериментальних підходів до використання ЦКЗ у контексті підсилення.

4. Подальші дослідження мають зосередитися на розробці нових підходів до моделювання, моніторингу стану конструкцій і вдосконаленні методів їхньої реконструкції та підсилення для забезпечення їхньої безпеки і довговічності. Зокрема, необхідно звернути увагу на інноваційні неруйнівні методи моніторингу.

5. Отже, виявлено декілька проблемних і недостатньо вивчених аспектів: відсутність адаптованих методик підсилення для конструкцій із різними ступенями пошкодження; обмежене використання ЦКЗ для повнорозмірних елементів; нестача комплексних моделей, що враховують складні механізми деградації.

На підставі зроблених висновків поставлено задачі досліджень, які виконано в даній роботі.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Визначення пріоритетних факторів для дослідження і планування програми досліджень

Будь-яку будівельну конструкцію необхідно розглядати як комплексну систему, для якої можна виділити ряд впливових внутрішніх параметрів (input parameters) і певну кількість вихідних параметрів (output parameters). Основною задачею дослідження роботи конструкції є вивчення зв'язків між цими параметрами для подальшого керування роботою конструкції і її оптимізації. Якій підібрані параметри об'єкта дослідження загалом є результатом компромісу між декількома цільовими рівнями значень несучої здатності. Відповідно, з метою отримання найбільш повного розуміння роботи інженерної конструкції (design exploration,-DE) необхідно дослідити ряд можливих комбінацій внутрішніх параметрів (design points,-DP). Виконання експериментальних випробувань великої кількості зразків вимагає значних технічних, матеріальних і часових ресурсів і часто є неефективним. Відповідно, метою цього підрозділу є ідентифікація найбільш впливових параметрів моделі залізобетонної балки з пошкодженою арматурою, підсиленої карбоновими стрічками, з метою ефективного формування експериментальної програми. В даній роботі з метою побудови оптимальної програми експериментальних досліджень і вибору основного змінного параметра використано інтегрований в Ansys Workbench застосунок Ansys DesignXplorer [93]. Робота застосунку заснована на математичних алгоритмах параметричної оптимізації: планування експерименту (design of experiment,-DOE), створення та аналіз поверхонь відповідей (response surfaces), оптимізація за методом 6 σ , і т.д. Загальна послідовність вивчення роботи конструкції з використанням даного програмного забезпечення наведена на рис.2.1. Детальніша візуалізація основних етапів аналізу параметрів моделі, оптимізації і планування експерименту, а також перелік умовних скорочень, використаних в цьому розділі наведено в Додатку А (Див. рис. А.1-А.2).

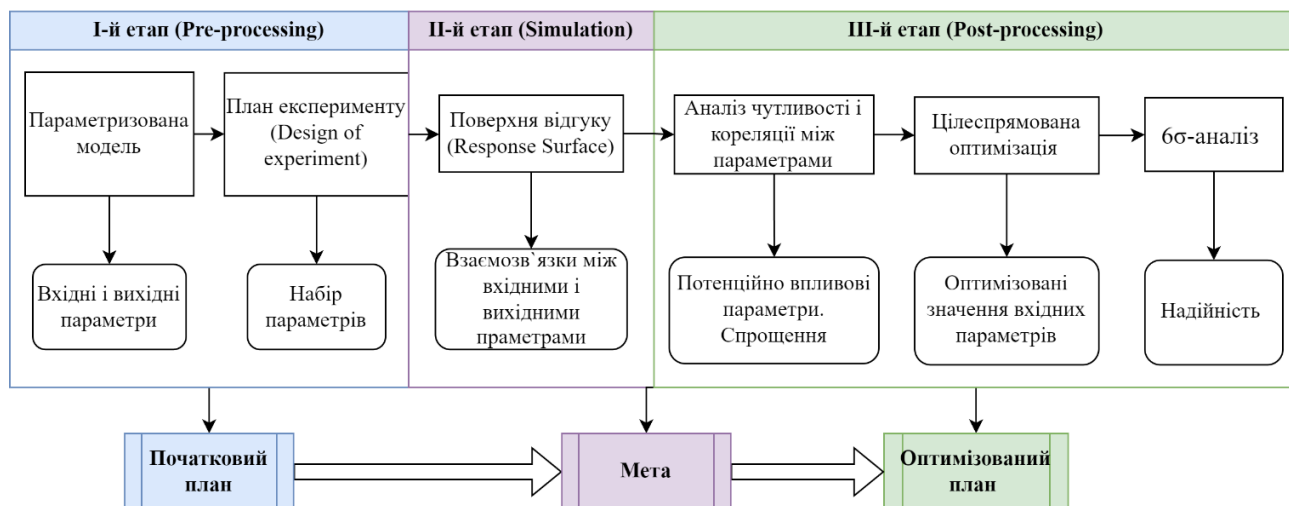


Рис.2.1. Використання ПЗ Ansys DesignXplorer для дослідження роботи інженерної конструкції.

На першій стадії було створено в середовищі Design Modeller геометричну модель залізобетонної балки з підсиленням композитними матеріалами. Геометричні розміри, армування і схему навантаження було змодельовано відповідно до планованих параметрів експериментальних зразків. Зокрема, згідно з поставленою задачею дослідження моделювалось корозійне пошкодження робочої арматури (зменшення ефективного діаметру) і підсилення композитними стрічками. На цьому етапі було визначено такі внутрішні параметри для аналізу їх впливовості: довжина, ширина і товщина композитної стрічки, діаметр (радіус) робочої арматури. В подальшому було згенеровано скінчено-елементну модель в іншому модулі Mechanical APDL з відповідними характеристиками: закріпленням від поперечного зсуву, адаптивною сіткою скінченних елементів, нелінійними характеристиками матеріалів і відповідною сіткою скінченних елементів (див. рис.2.2.).

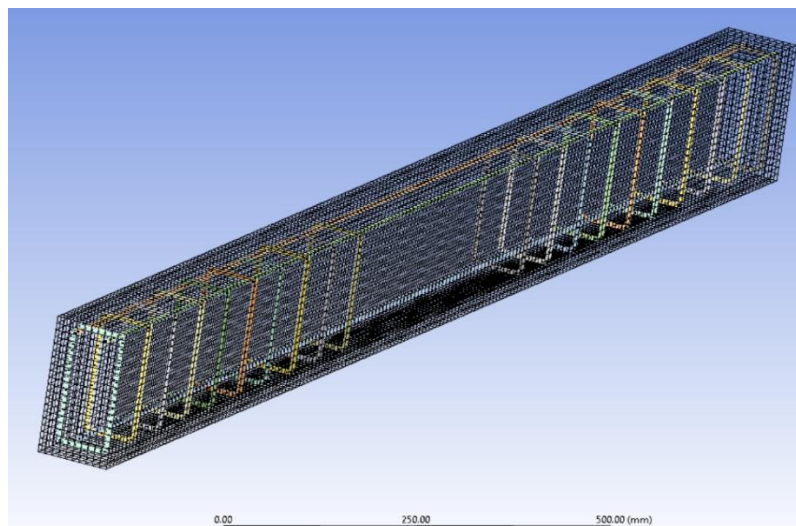


Рис.2.2. Створення скінчено-елементної моделі залізобетонної балки з підсиленням композитними матеріалами в середовищі Design Modeller.

Нелінійні характеристики бетону моделювались з використанням моделі критерія міцності за Дрюкером-Прагером (Drucker-Prager Strength Piecewise) [56]. З використанням командних рядків було змодельовано Solid 65,- доступний у бібліотеці елементів Ansys є суцільним елементом із 8 вузлами і 3 ступенями свободи для повороту на кожному вузлі, здатний моделювати тріщини в розтягнутій зоні, кришення,- в стиснутій, пластичну деформацію та повзучість. Для моделювання робочої арматури використано LINK180, - кінцевий елемент для моделювання лінійних елементів у тривимірних конструкціях, який є лінійним 3D компонентом із двома вузлами, з'єднаними лінійним елементом. Кожен вузол має три ступені свободи, що дозволяє переміщення вздовж осей X, Y, Z. LINK180 підтримує нелінійні властивості матеріалів, зокрема пластичність, великі переміщення та інші нелінійні ефекти. Для моделювання зони контакту композитної стрічки з поверхнею бетону було створено окрему поверхневу геометрію (surface body) з фізичними і механічними характеристиками епоксидного клею. В цьому модулі також зазначаємо для яких параметрів проводимо оптимізацію інженерної задачі. В якості результуючих параметрів оптимізації приймаємо наступні: максимальний прогин, енергія, витрачена на деформування, максимальна відстань проковзування композитної стрічки.

У вихідній моделі для внутрішніх параметрів було задано значення: довжина стрічки -1500 мм, ширина-25 мм, товщина- 1.2 мм, радіус арматури 7 мм (діаметр 14 мм). В окремому підпроцесорі Design Exploitation для цих параметрів було задано ширші діапазони варіації (див. табл.2.1).

Таблиця 2.1

Параметризований план експерименту для аналізу впливовості параметрів

Параметри		Характеристика	Діапазони варіації/ мета оптимізації
1		2	3
Вхідні	P1-Довжина стрічки, мм	Ефективність запроєктованого підсилення і використання композитної стрічки	1350...1650
	P2-Ширина стрічки, мм		22.5...27.5
	P3-Товщина стрічки, мм		1.08...1.4
	P4-Залишковий діаметр (радіус) арматури	Ступінь корозії (зниження несучої здатності)	6 (12) ...10 (20)
Вихідні	P5-Прогин, мм	Деформативність і пластичність конструкції	максимізувати
	P6-Енергія, витрачена на деформацію, мДж		максимізувати
	P7-Відстань проковзування стрічки, $\text{мм} \times 10^{-5}$	Забезпечення сумісної роботи без відшарування стрічки	мінімізувати

Відповідно до заданого діапазону згідно з принципом рандомізації автоматизовано створено 25 точок комбінації цих змінних (design points,- DP), прораховуючи для кожної значення параметрів відгуку (див. рис.А.2).

Після створення плану експерименту (DOE), для кожного результуючого параметру створюється поверхня відгуку. Поверхні відгуку побудовано за принципом Genetic Aggregation (GA) [56], що передбачає автоматизований процес вибору, налаштування та генерації поверхні відгуку, яка найкраще підходить для кожного результуючого параметра задачі (див. рис. А.3). Незважаючи на те, що даний спосіб побудови поверхонь відгуку передбачає триваліший процес, аніж інші (наприклад, поліном 2-го порядку, непараметрична регресія, кригінг) через ітераційний процес розв'язку і крос-валідації отриманих результатів, цей принцип здебільшого забезпечує більшу достовірність результатів. Загальний принцип GA полягає в послідовному продукуванні множин різних поверхонь відгуку з метою вибору найбільш оптимальної. В цьому випадку, вирішальну роль матиме функція допасованості (fitness function) для визначення найбільш ефективного принципу

моделювання, згідно з крос-валідацією в окремих DP і загальної стійкості поверхні на всьому діапазоні [93]. Чисельно поверхня відгуку за принципом GA може бути описана через середнє зважене різних метамodelей:

$$\hat{y}_{ens}(x) = \sum_{i=1}^{N_{\mu}} w_i \cdot \hat{y}_i(x), \quad (2.1)$$

де $\hat{y}_{ens}$ відповідає прогнозованому значенню узгодження метамodelей, $\hat{y}_i$ - прогнозування і-ї поверхні відгуку, $N_{\mu} \geq 1$ - кількість використаних метамodelей, w_i - вагові фактори поверхні відгуку, що задовільняють умову (2.2.):

$$\sum_{i=1}^{N_{\mu}} w_i = 1; w_i \geq 0; 1 \leq i \leq N_{\mu}, \quad (2.2)$$

Найкращі значення вагового коефіцієнта оцінюються згідно з мінімальною середньоквадратичною помилкою (Root Mean Square Error,-RMSE) на кожній точці (DP) в $\hat{y}_{ens}$, а RMSE на цій самій DP,- шляхом крос-валідації $\hat{y}_{ens}$ ($PRESS_{RMSE}$):

$$RMSE(\hat{y}_{ens}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y(x_j) - \hat{y}_{ens}(x_j))^2}, \quad (2.3)$$

$$PRESS_{RMSE}(\hat{y}_{ens}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y(x_j) - \hat{y}_{ens,-j}(x_j))^2}, \quad (2.4)$$

$$\hat{y}_{ens,-j}(x) = \sum_{i=1}^{N_{\mu}} w_i \hat{y}_{i,-j}(x), \quad (2.5)$$

де $y(x_j)$,- значення вихідного параметра в кожній j-ї DP (x_j), N-загальна кількість DP, $\hat{y}_{i,-j}$ - передбачення і-ї поверхні відгуку, побудованої без врахування j-ї DP [93].

Оптимізація і доповнення поверхні відгуку за допомогою додатково згенерованих точок виконувалась напів-автоматично згідно з параметром якості відтворення (the goodness of fit,-GoF) (див. рис. А.3). Цей параметр слугує мірою для оцінки якості поверхні відгуку (стійкість, надійність, якість передбачення вихідних результатів) шляхом аналізу похибки між передбаченими і отриманими результатами для кожної точки (DP). Одержані поверхні відгуку для кожного із параметрів є комплексним багатоцільовим ресурсом для дослідження поведінки

інженерної конструкції (див схему на рис. А.1) і в подальшому використовуються для визначення пріоритетних факторів при складанні програми експерименту.

Аналіз роботи конструкції спочатку було проведено на основі графіків чутливості (Sensitivity Analysis), оскільки вони графічно відображають відносний вплив вхідних параметрів на вихідні параметри. Таким чином, як видно з рис. 2.3 найбільший вплив на прогини балки матиме зміна діаметру робочої арматури (ступінь корозії), при цьому чутливість цього показника до інших факторів є досить низькою. Також, потенційно пріоритетним параметром є ширина карбонової стрічки, оскільки, згідно з графіками вона має значний вплив на відстань проковзування.

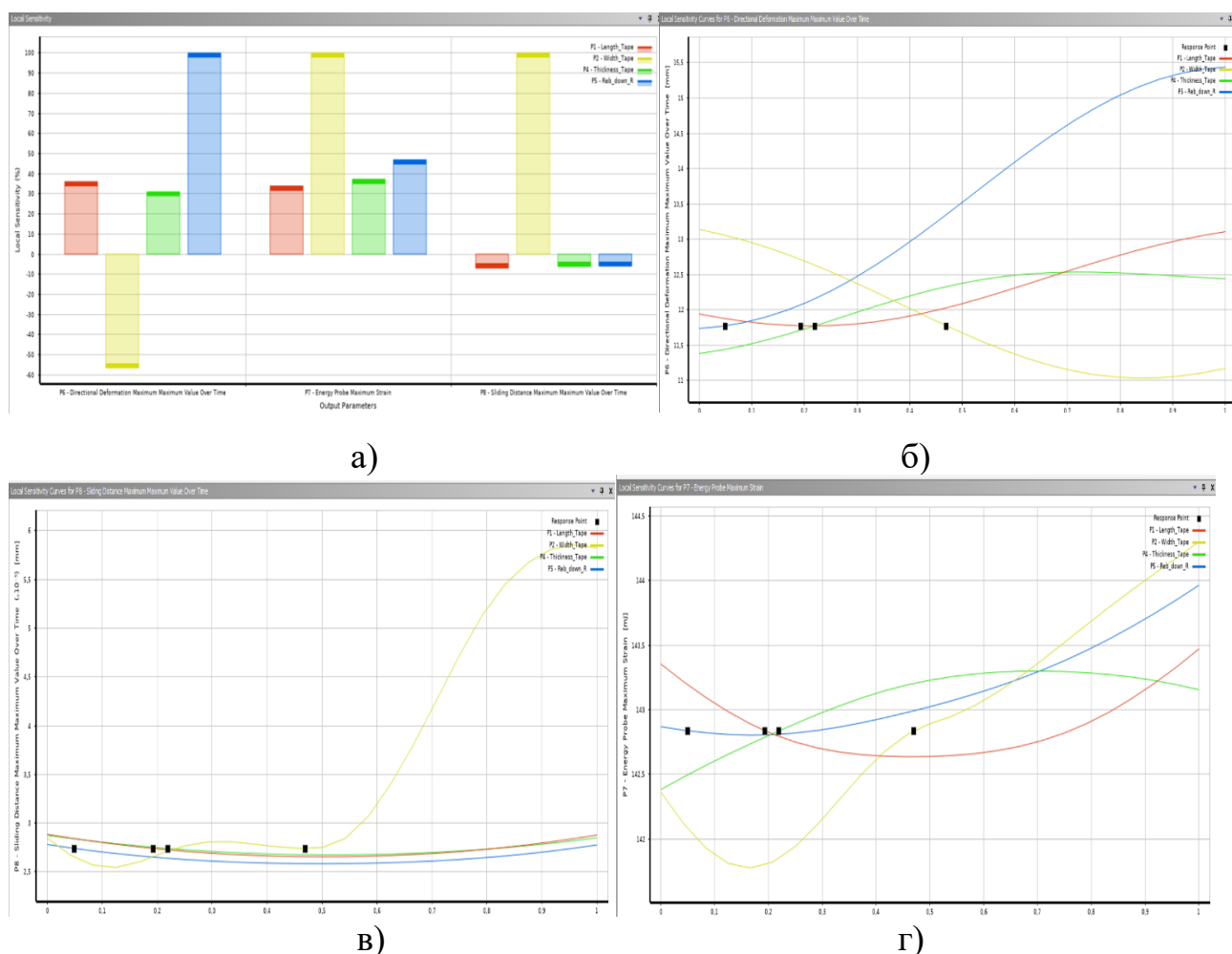


Рис.2.3. Графіки чутливості вихідних параметрів до вхідних (Sensitivity Analysis): а)-загальна гістограма; б)-графіки чутливості максимального прогину до вхідних параметрів; в)-те саме для максимальної довжини проковзування; г)-те саме для енергії деформації

Графіки на рис. 2.3.(б-г) є локалізованим уточненням загального аналізу впливовості окремих параметрів. Як бачимо, очевидно переважаючим за впливом є діаметр робочої арматури (див. рис.2.3.б) для всіх рівнів значень. Графік на рис. 2.3.в свідчить, що ширина стрічки має домінуючий вплив на порушення її анкерування при більших значеннях цього параметра. Додатково взаємозв'язки між параметрами наведено на рис. А.4.

Власне поверхня відгуку, як найбільш комплексне відображення залежності параметрів, наведена в різних варіаціях на рис.2.4. На цьому етапі дослідження роботи інженерної конструкції було виділено 2 потенційно пріоритетних вхідні параметри для планування експерименту: Р1-ступінь корозії робочої арматури і Р2-ширина стрічки підсилення. Однак, необхідно зазначити, що Р2 має вплив лише на відстань проковзування стрічки, а цей показник для всіх проаналізованих варіацій не перевищує значення 6.5×10^{-5} мм, що є меншим за товщину шару епоксидного клею і, відповідно, не буде визначальним для роботи досліджуваної балки і не буде репрезентативним протягом експериментальних досліджень. Отже, робимо висновок, що доцільно прийняти ступінь корозії робочої арматури за основний змінний параметр, а решту параметрів зафіксувати на певному сталому рівні.

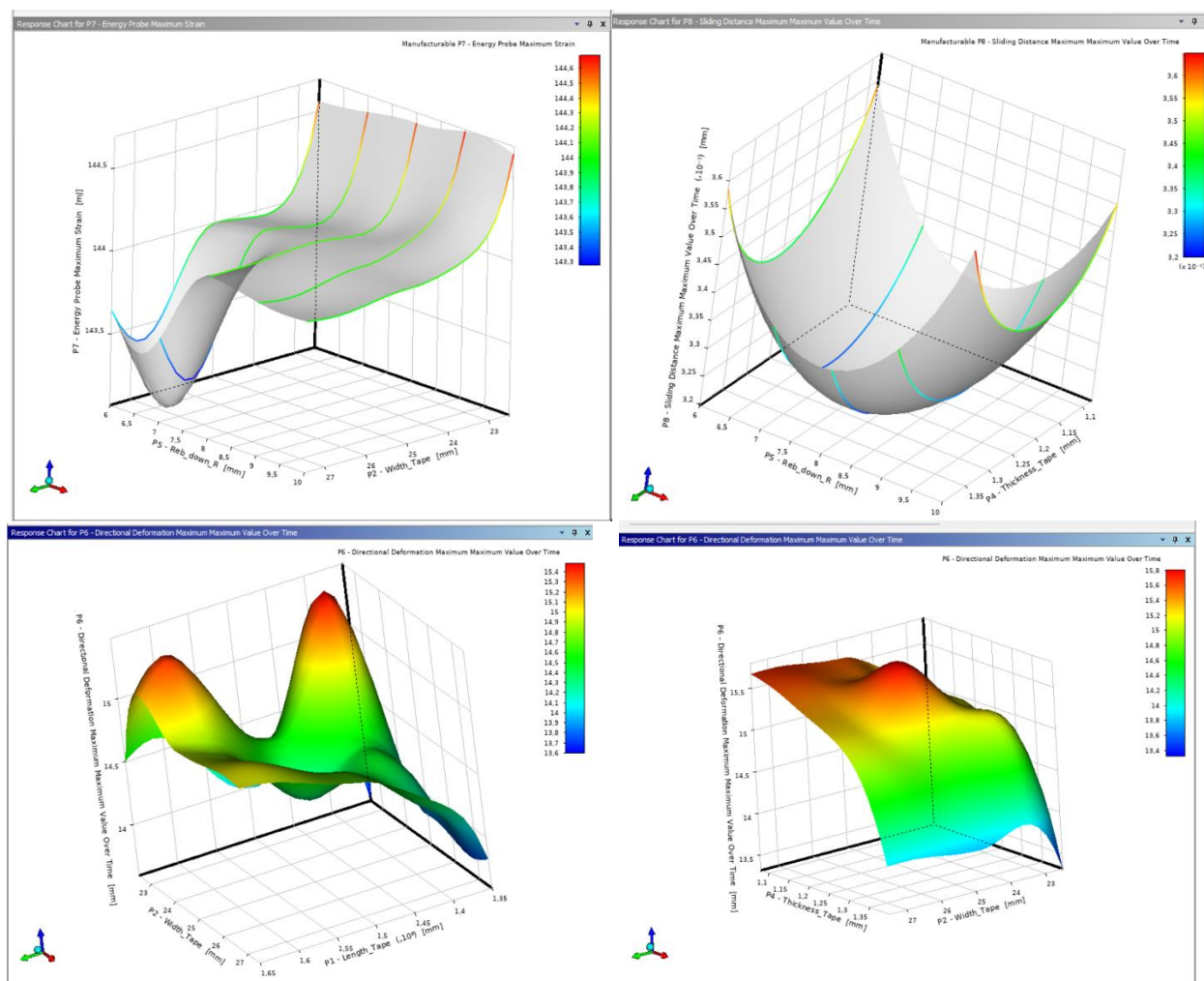


Рис.2.4. Поверхні відгуку при різній варіації вхідних параметрів, згенеровані ПК Ansys DesignXplorer

При складанні ефективного плану експерименту важливо розуміти кореляційні зв'язки між окремими параметрами, що також продемонструють наскільки всі параметри в системі є взаємозалежними. Крім того, подальша цілеспрямована оптимізація плану експерименту з багатьма вхідними параметрами передбачає збільшення кількості проектних точок (DP) і значною тривалістю обчислень. Кореляційний аналіз, натомість, дозволяє визначити та оцінити можливі зв'язки між змінними, зменшити генерацію непотрібних точок вибірки та усунути вплив можливих кореляційних залежностей між вхідними параметрами. Хоча в цьому конкретному дослідженні кількість вхідних параметрів знаходиться в прийнятному діапазоні, кореляційна матриця може бути ефективним інструментом для кількісної оцінки вагомості окремих вхідних змінних і

забезпечення їх взаємної незалежності. Зокрема, було оцінено ступінь кореляції між параметрами при лінійному і квадратичному взаємозв'язку, для чого було згенеровано 57 точок з різними комбінаціями вхідних параметрів. Лінійний зв'язок між параметрами було оцінено за допомогою коефіцієнта кореляції Спірмена. При дослідженні квадратичних зв'язків, ступінь кореляції було оцінено за допомогою коефіцієнта детермінації квадратичної регресії. На основі розрахованих показників було згенеровано кореляційну матрицю і квадратичну матрицю детермінації для аналізу ступеню чутливості вихідних факторів до вхідних (див. рис.2.5).

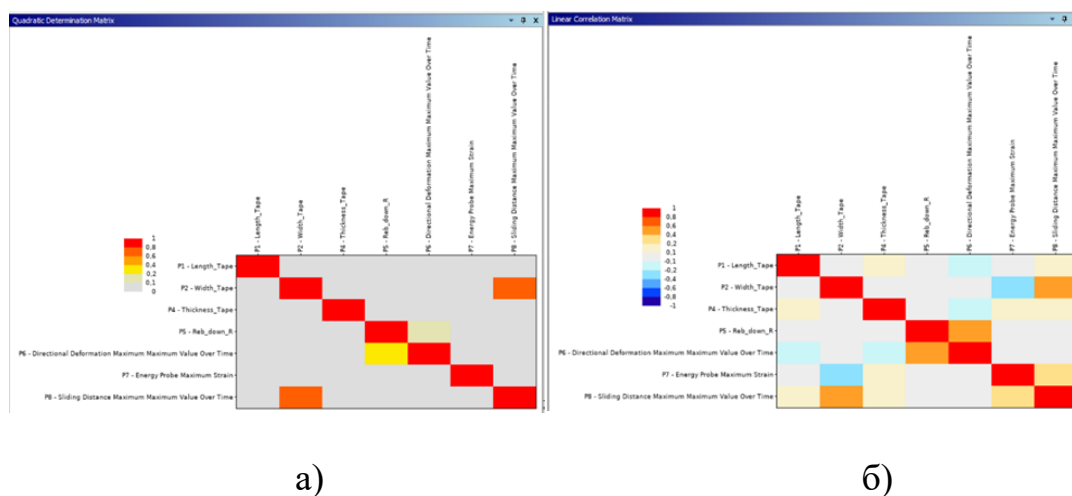


Рис.2.5. Результати кореляційного аналізу для конструкції: а)-квадратична матриця детермінації для параметрів, б)- кореляційна лінійна матриця.

Кореляційна матриця є ефективним візуальним відображенням кореляції між параметрами системи. Низький рівень кореляції між вхідними параметрами свідчить про їх взаємну незалежність, а кореляція в парах вхідний-вихідний параметри дозволяє визначити перспективно пріоритетні фактори для дослідження. Зокрема, найвищу кореляцію було визначено для параметрів радіус арматури-максимальна деформація P4-P5 (0.319) і ширина стрічки-максимальна відстань проковзування P2-P7 (0.804), що підтверджує визначені вище зв'язки на етапі оцінки графіків чутливості. Матриця детермінації є схожим інструментарієм для візуального відтворення нелінійної (квадратичної) інформації, однак на відміну від лінійної матриці, враховує коефіцієнт детермінації (R^2) між усіма парами параметрів і не є симетричною. Відповідні показники коефіцієнтів детермінації для

пар параметрів радіус арматури-максимальна деформація і ширина стрічки-максимальна відстань проковзування становлять 0.390 і 0.647. Також, діаграми розсіювання для цих 2-х пар з найвищою кореляцією (див. рис. 2.6) дозволили в цьому дослідженні побудувати лінійні та квадратичні лінії тренду, визначити лінійні та квадратичні коефіцієнти детермінації і проаналізувати ступінь рівномірності кореляційних зв'язків при різних значеннях цих параметрів.

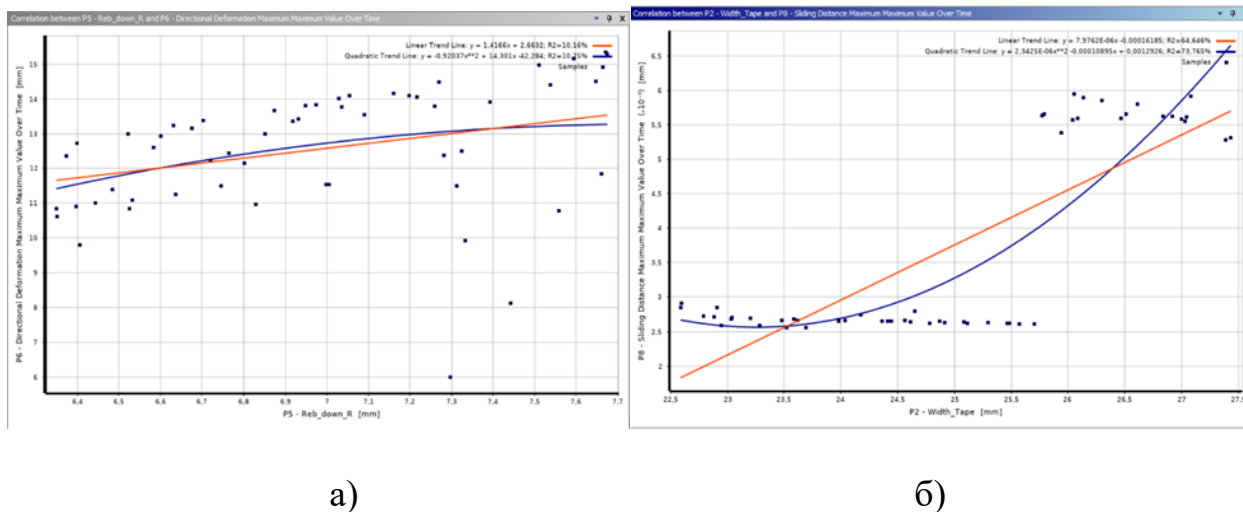


Рис.2.6. Діаграми розсіювання кореляційних значень для пари параметрів: а)- радіус арматури-максимальна деформація (P4-P5), б)- ширина стрічки-максимальна відстань проковзування (P2-P7)

Як бачимо з графіків, для першої пари параметрів розподіл точок є більш монотонним, тобто маємо можливість прослідкувати взаємозв'язок між цими параметрами на різних рівнях. Хоча для другої пари ступінь кореляції є досить високим на окремих ділянках графіків, встановлені тренди не є досить репрезентативними, оскільки проаналізовані точки розподілені не достатньо рівномірно.

На наступному етапі була проведена цільова оптимізація (goal-driven optimization,-GDO), яка дозволяє вибрати найкращі варіації вхідних параметрів із вибірки з урахуванням цілей або обмежень, встановлених для вихідних параметрів. Загальна структура цільової оптимізації полягає у процесі ітераційного прийняття рішень (Decision Support Process,- DSP) з метою задоволення критеріїв, які встановлені з врахуванням довільних критеріїв для атрибутів параметрів за

допомогою методу зваженої сукупності. DSP загалом можна описати як пост-обробку даних за принципом границі Парето за результатами різних методів оптимізації. Границю Парето (Pareto frontier) можна описати наступним чином. Розглянемо систему, що описується функцією $f: X \rightarrow \mathbb{R}^m$, де X -це компактний набір можливих рішень у метричному просторі $\mathbb{R}^m$, Y ,- можливий набір критеріальних векторів в $\mathbb{R}^m$, $Y = \{y \in \mathbb{R}^m : y = f(x), x \in X\}$. Припустимо, що вже відомі переважні напрямки значень критеріїв. Нехай точка $y'' \in \mathbb{R}^m$ краще відповідає шуканому критерію аніж $y' \in \mathbb{R}^m$ (що запишемо як $y'' \succ y'$). Тоді границю Парето можна описати як:

$$P(Y) = \{y' \in Y : \{y'' \in Y : y'' \succ y', y' \neq y''\} = \emptyset\} \quad (2.6)$$

В даній задачі було використано метод оптимізації MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm), який є варіантом поширеного алгоритму NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II), який дозволяє пошук глобального оптимуму за багатьма критеріями і обмеженнями та базується на концепції контрольованої пріорітизації. В цьому дослідженні розглянемо 2 напрямки оптимізації: збільшення максимального прогину і енергії, поглинутої на деформування (і , відповідно, збільшення несучої здатності) і зменшення відстані проковзування композитної стрічки. Спочатку було згенеровано 4000 точок, додатково,- 800 зразків на кожній ітерації і як результат, вибрано 3 точки-оптимуми, протягом не більше ніж 20 ітерацій. В даному випадку вдалось досягнути достатньої збіжності після розрахунку 9113 зразків (див. рис.2.7) і було визначено 3 точки-кандидати з відповідними вхідними параметрами див. табл.2.2).

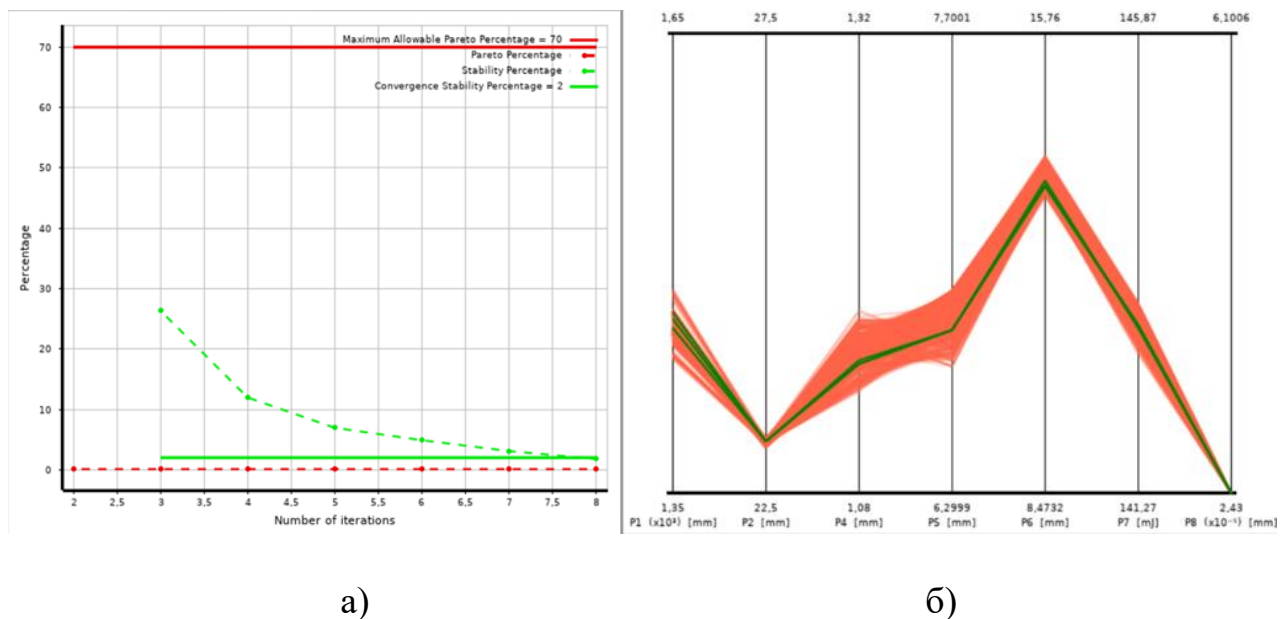


Рис.2.7. Процес оптимізації поверхні відгуку в Ansys DesignXplorer: а)- процес оптимізації за границею Парето; б)- сукупність розрахованих зразків

Таблиця 2.2

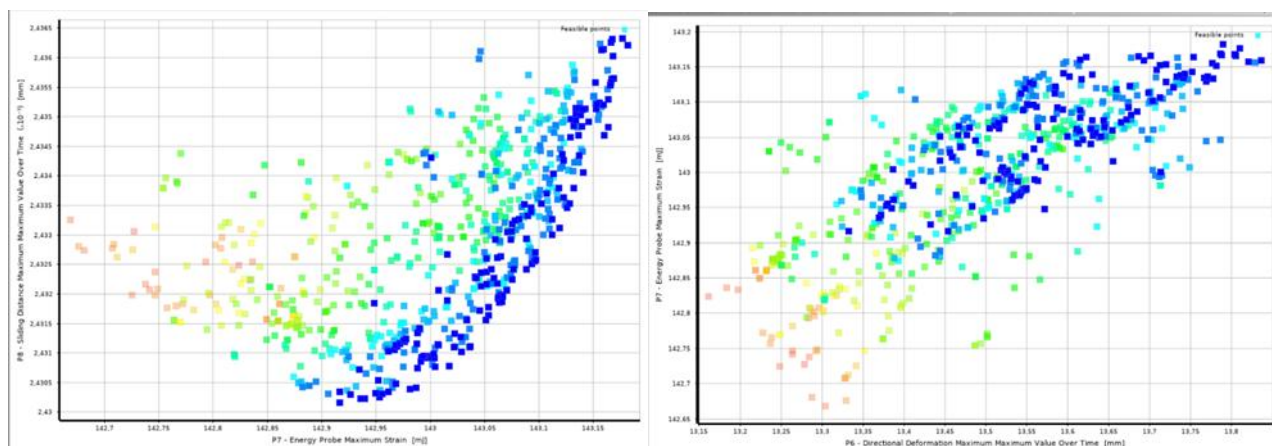
Значення вхідних параметрів після проведення оптимізації

Параметр	Значення для точок-кандидатів		
1	2	3	4
Довжина композитної стрічки (мм)	1478.50	1474.15	1468.22
Ширина композитної стрічки (мм)	24.57	24.567	24.37
Товщина композитної стрічки (мм)	1.147	1.149	1.148
Радіус арматури (діаметр) (мм)	6.799 (13.598)	6.797 (13.594)	6.799 (13.598)

Візуально діапазон можливих варіацій вхідних параметрів наведено на так званих графіках компромісу (Trade-off), які дозволяють переглянути діапазон потенційних точок залежно від наближення їх до цільової границі (див. рис.2.8).

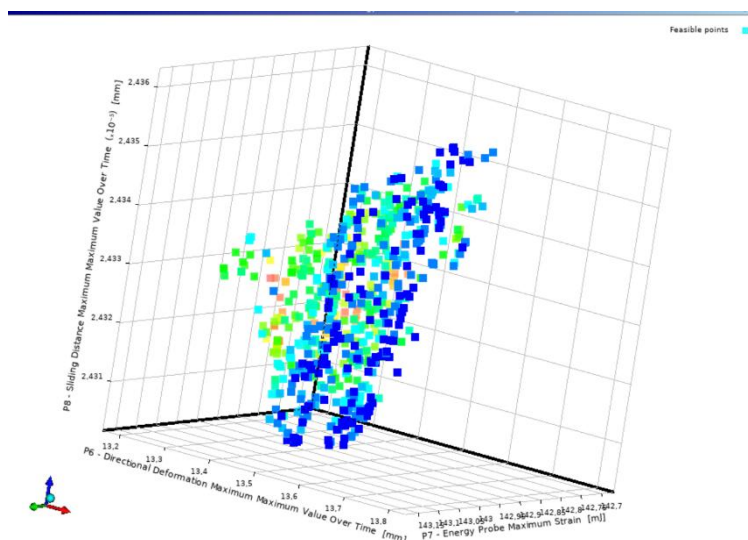
При створенні і аналізі скінчено-елементної моделі конструкції використовують детерміновані значення розмірів, навантажень, граничних умов і значень матеріалів. В інженерній практиці значення різних показників конструкції варіюються в певному діапазоні (детальніше в роботах [136-138]). Для того щоб проаналізувати наскільки невизначеність вхідних параметрів впливає на достовірність вихідних значень проведено бс-аналіз. Відповідно, було використано нормальний розподіл для опису 4 вхідних параметрів (див. рис. А.5). Основний принцип бс-аналізу полягає в перевірці, чи при наявності невизначеності у вхідних

параметрах (їх статистичному нормальному розподілу) результуючі параметри системи у 99.7% випадках потраплять в очікувані межі (так званий 6σ -критерій).



а)

б)



в)

Рис.2.8. Процес пошуку ефективного рішення в діапазоні можливих варіацій вхідних параметрів: а) 2D представлення для 2 вхідних параметрів P6-P7, б) те саме для пари P5-P6, в) 3D- представлення для 3-х параметрів

Після проведення аналізу було оцінено кінцевий розподіл вихідних параметрів для оцінки ймовірності їх підпадання в очікувані межі (див. рис. А.6, табл. 2.3). Зокрема, було встановлено такі статистичні показники (див. табл. 2.3): Стандартне відхилення (Standard deviation) як показник розсіювання від середнього значення, коефіцієнт асиметрії (Skewness) як міра ступеня асиметрії щодо

середнього значення для розподілу, ексцес (Kurtosis), як міра відносної піковості/рівномірності розподілу, ентропія (Shannon Entropy), як міра невпорядкованості в системі, тощо.

Таблиця 2.3

Статистичні показники розподілу вихідних параметрів

Показник	Значення для параметрів		
	Прогин	Енергія витрачена на деформацію	Відстань проковзування
1	2	3	4
Стандартне відхилення (Standard deviation)	0.676	0.619	7.37×10^{-6}
Коефіцієнт асиметрії (Skewness)	-0.776	-1.201	1.318
Ексцес (Kurtosis)	1.174	2.117	1.255
Ентропія (Shannon Entropy)	0.967	0.493	-10.793

Як можна побачити візуально з графіків і з чисельних даних, наведених в таблиці, найбільший ступінь невизначеності матиме відстань проковзування стрічки, тобто цей показник залежить від дуже великої кількості інших факторів, що не були розглянуті. Відповідно, він не буде репрезентативним для експериментального дослідження, також і через дуже малі значення, які буде складно відслідкувати протягом експерименту. З іншої сторони, максимальний прогин підпадає під найбільш рівномірний розподіл, тобто певна недетермінованість характеристик конструкції буде слабше впливати на нього. На графіках на рис. А.6. наведені також кумулятивні функції розподілу для цих величин, що дозволяють візуально оцінити надійність і достовірність значень. Використаний в дисертаційній роботі підхід для визначення пріоритетних факторів і оптимізації програми досліджень був висвітлений в опублікованих тезах конференції [137].

Автоматизована оптимізація поверхні відгуку дозволила виділити перспективні параметри плану експерименту. Як зазначено вище, ступінь корозії доцільно прийняти за основний змінний параметр, моделюючи його за допомогою сточування арматурних стержнів до певного значення. З огляду на проведене детальне моделювання, оцінку достовірності експериментальних результатів доцільно брати монотонний розподіл значень цього параметру (тобто однаковий

крок сточування). Оптимізація плану експерименту дозволила встановити, що для розмірів карбонової стрічки доцільно прийняти товщину 1.2 мм, ширину, -25 мм , а довжину близько 1500 мм (значення заокругленні з метою спрощення процесу виробництва експериментальних зразків). Також необхідна довжина стрічки в подальшому буде уточнена з умов анкерування (див. додаток Б).

2.2. Програма експериментальних досліджень

Експериментальна частина дисертаційного дослідження була виконана згідно із попередньо розробленою комплексною програмою (див. рис.2.9.).

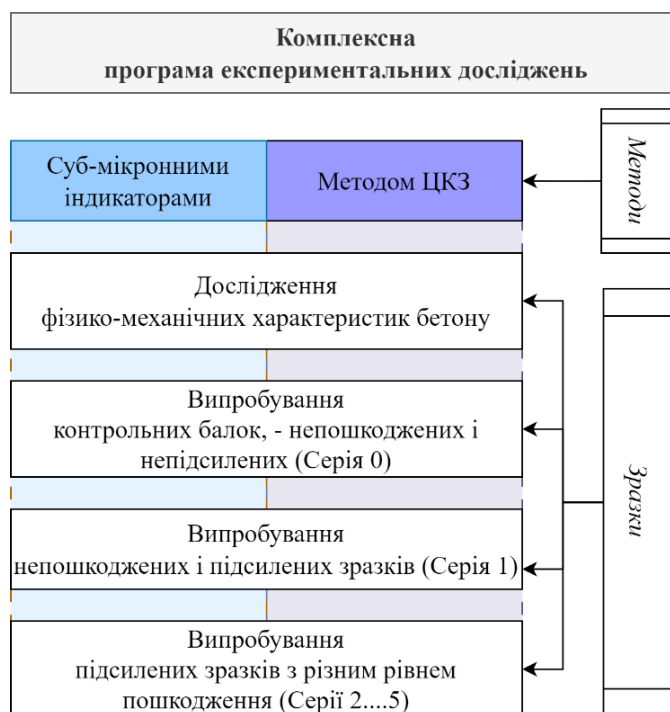


Рис.2.9. Комплексна програма експериментальних досліджень

Програма передбачала випробування в лабораторних умовах повнорозмірних зразків залізобетонних балок з різним рівнем пошкодження розтягнутої арматури, підсилених карбоновими стрічками. Для визначення фізико-механічних характеристик бетону і побудови повної діаграми деформування бетону передбачено випробування бетонних кубиків і призм. Для отримання достовірних результатів експериментального дослідження паралельно застосовано метод цифрової кореляції зображень і суб-мікронні індикатори. Для досягнення

поставленої мети і виконання задач даного дослідження було запроєктовано і виготовлено в заводських умовах 12 залізобетонних балок натурних розмірів $2100 \times 200 \times 100$ мм, 9 бетонних призм розмірами $600 \times 150 \times 150$ мм, 15 бетонних кубиків $150 \times 150 \times 150$ мм.

В робочій арматурі залізобетонних балок виконано моделювання корозії арматури шляхом проточування до різних значень еквівалентного діаметра, що дозволило змодельовати роботу конструкцій з різним рівнем пошкодження, які в подальшому підсилюють композитними матеріалами. Балки були поділені на серії згідно з спеціально розробленою підпрограмою (див. табл.2.4). Загалом, балки поділено на 6 серій включно з контрольними, які були непошкоджені і непідсилені. Прийнято наступне маркування: КБ-контрольна балка, ПБ-підсилена балка, перша цифра позначає серію (0...5), друга,-порядковий номер зразка. Такий розподіл між серіями дозволить оцінити ефект підсилення карбоновою стрічкою для різних ступенів пошкодження робочої арматури.

Таблиця 2.4.

Підпрограма експериментальних досліджень залізобетонних балок

№	Маркування	Діаметр арматури, мм	Відсоткова втрата поперечного перерізу арматури	Примітки
1	2	3	4	5
1	КБ-0-1	Ø20	0	Контрольні, непошкоджені, непідсилені
2	КБ-0-2	Ø20	0	
3	ПБ-1-3	Ø20	0	Непошкоджена арматура, підсилені
4	ПБ-1-4	Ø20	0	
5	ПБ-2-5	Ø20→Ø18	20%	Сточена арматура, підсилені
6	ПБ-2-6	Ø20→Ø18	20%	
7	ПБ-3-7	Ø20→Ø16	36%	
8	ПБ-3-8	Ø20→Ø16	36%	
9	ПБ-4-9	Ø20→Ø14	51%	
10	ПБ-4-10	Ø20→Ø14	51%	
11	ПБ-5-11	Ø20→Ø12	64%	
12	ПБ-5-12	Ø20→Ø12	64%	

2.3. Методика визначення оптимальних параметрів кореляційного спеклу на досліджуваній поверхні бетону

Досвід досліджень роботи залізобетонних конструкцій дозволяє стверджувати, що у більшості випадків максимальні зусилля виникають в локалізованих зонах. Загалом, зусилля і деформації концентруються в зонах тріщиноутворення і на ділянках з неоднорідностями матеріалу, що спричиняє складний напружено-деформований стан в залізобетонному елементі. Комбінація стандартних методів навантаження і цифрової кореляції зображень дозволяє реєструвати деформації в локалізованому об'ємі матеріалу. Для таких задач особливо важливими є параметри кореляційного спекла, нанесеного на досліджувану поверхню, зокрема розмір крапок. Для аналізу різних розмірів крапок проведено експериментальне випробування 3 зразків, бетонних призм розмірами 600×150×150 мм. Реєстрація зображень проводилась з використанням монохромних камер "Grasshopper 3"(Flir (Canada) з лінзами Computar F25/2.8 і Canon EF 70-200MM F/2.8 L IS III USM. Детальніше методика визначення оптимального кореляційного спеклу описана в роботі [72].

Підготовка поверхні бетонних зразків передбачала шліфування поверхні за допомогою кутової шліфувальної машини і шліфувального каменю і подальше очищення її розчинником. Для нанесення кореляційного спеклу було використано метод з перебиванням надрукованого рисунку на поверхню. За допомогою спеціального генератора спеклів від розробника програмного забезпечення (Speckle Pattern Fundamentals) було згенеровано 3 кореляційні спекли з розміром крапок 1, 1.5, 2 мм, густиною 50% і ступенем варіації 75%. Спекли роздруковувались на папері за допомогою лазерного принтера, після чого папір просочувався ацетоном, прикладався до бетонної поверхні для перенесення візерунку з крапок на неї. Приклад підготовленої поверхні наведено на рис. 2.10.

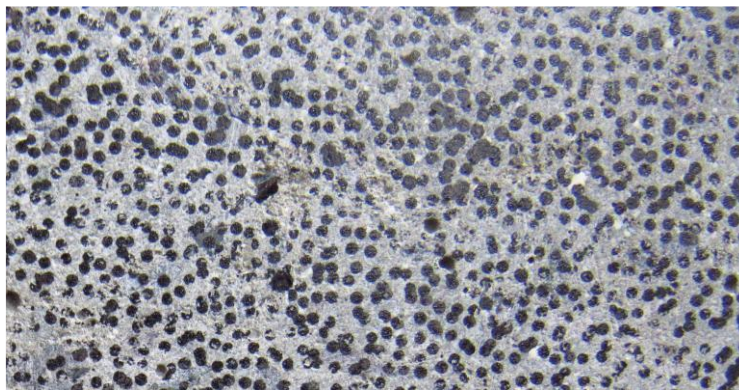
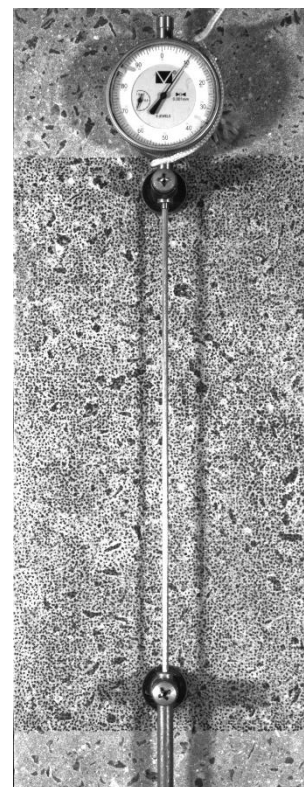


Рис. 2.10. Візерунок з крапок на досліджуваній бетонній поверхні

Навантаження на зразки створювалось за допомогою гідравлічного преса ПГ-250 і деформації записувались з інтервалом в 250 мс за допомогою камери зі швидкістю 50 кадрів/секунду. Для контролю значень, записаних методом ЦКЗ на призму було встановлено мікроіндикатор з точністю 0.001 мм і базою 200 мм. Загальний вигляд дослідного зразка наведено на рис. 2.11. Для додаткового освітлення було використано 2 LED-лампи.



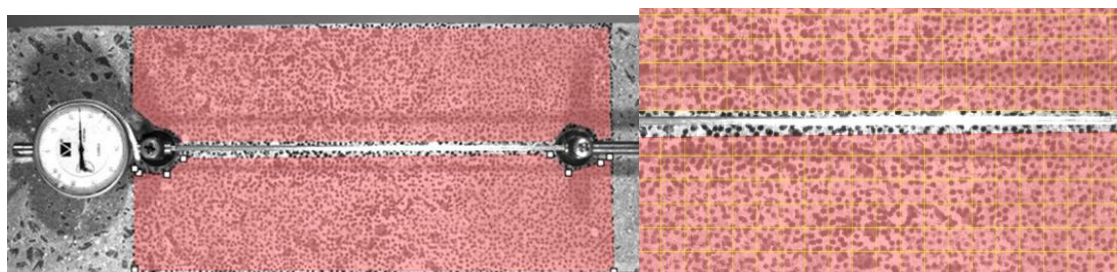
а)



б)

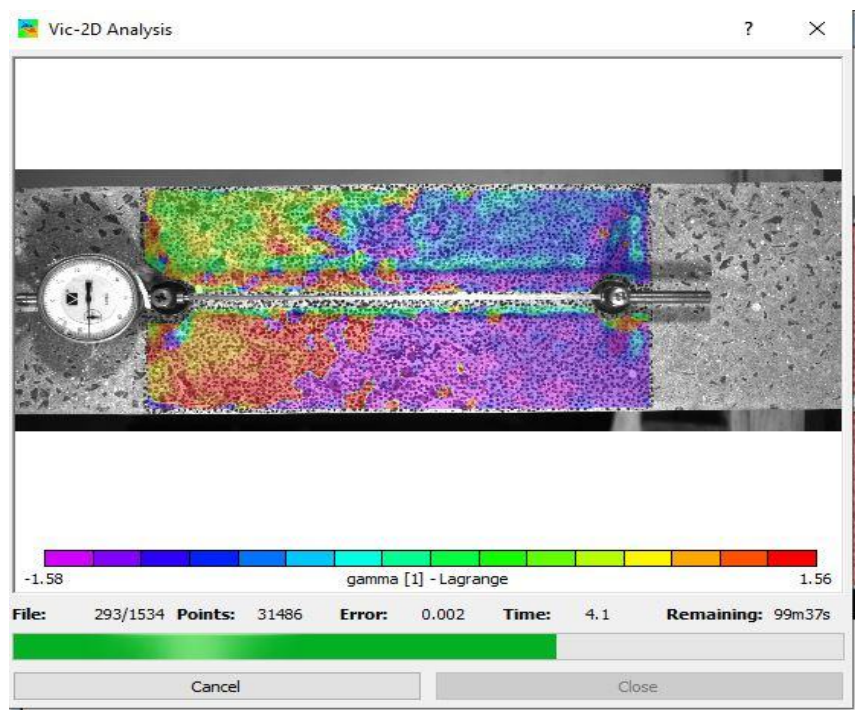
Рис. 2.11. Загальний вигляд зразка: використання мікро-індикаторів (а) і метода ЦКЗ (б) протягом експерименту

Для побудови повної σ - ϵ діаграми деформування бетону відео процесу завантаження було розділено на фотографії зі швидкістю 4 кадри/секунду. Таким чином навантаження синхронізовувалось з деформаціями, отриманими за допомогою підходу ЦКЗ і отриманими за допомогою індикаторів. Обробка фотографій виконувалась на спеціалізованому програмному забезпеченні (ПК-VIC-2D-7) для кожного зразка. В інтерфейсі програмного забезпечення вручну було виділено область інтересу (AOI) і обрано оптимальний розмір фрагментів (15 пікселів), що дозволило розділити досліджувану поверхню на підмножини з унікальною варіацією рівня сірого (див. рис. 2.12).



а)

б)



в)

Рис. 2.12. Процес аналізу в ПК VIC-2D: а) визначення області інтересу (AOI) при використанні методу ЦКЗ; б) поділ досліджуваної ділянки на окремі фрагменти; в) процес розрахунку в ПК

Процес аналізу в ПК VIC-2D показано на рис.2.12(в). Для визначення деформацій за методом ЦКЗ в програмному комплексі було виділено віртуальні екстензометри в середині зразка з базою в 200 мм.

Метод цифрової кореляції зображень дозволяє реєструвати значення деформацій по всій поверхні зразка на всіх етапах навантаження, включно із стадією руйнування. Таким чином, отримано повну діаграму руйнування бетону в координатах «напруження-деформація» (« σ - $\epsilon \times 10^5$ ») для бетонних призм з різними розмірами точок, що формують кореляційний спекл. Значення, заміряні методом ЦКЗ для зразків з розмірами точок 1 мм, 1.5 мм і 2 мм порівнювали зі значеннями деформацій, зареєстрованими за допомогою індикаторів (див. рис. 2.13).

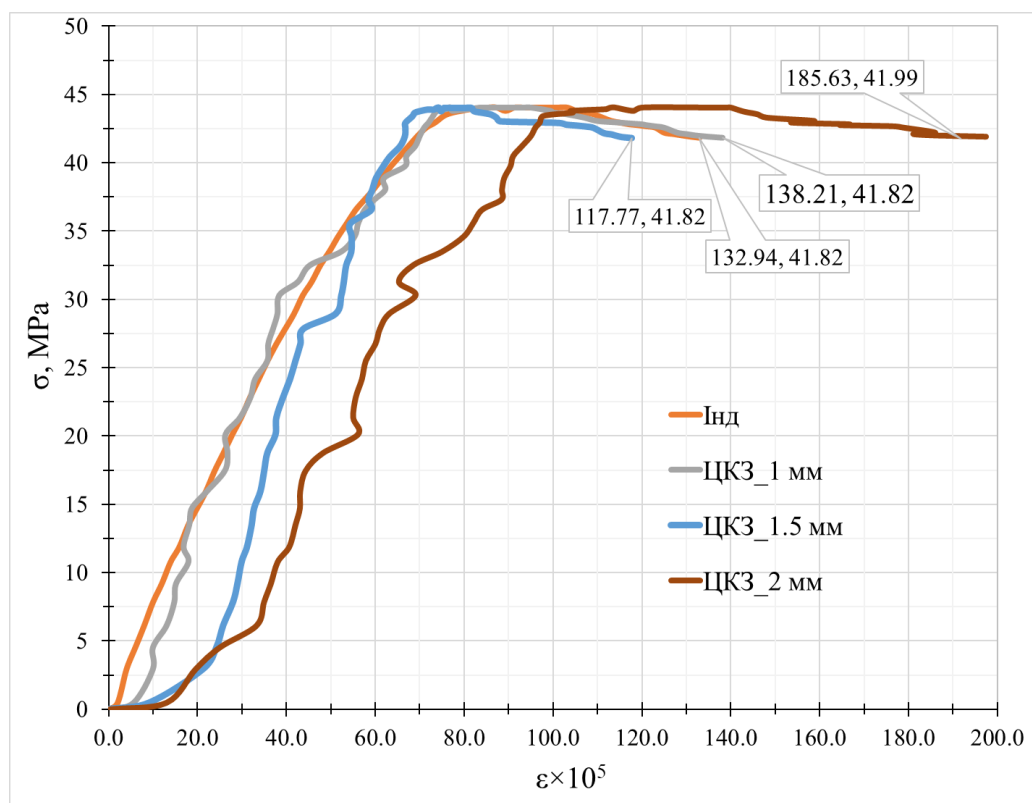


Рис. 2.13. Повна діаграма руйнування бетону для зразків із кореляційним спеклом із крапками розміром 1 мм (призма П1,-ЦКЗ_1 мм), 1.5 мм (призма П2,-ЦКЗ_1.5 мм) і 2 мм (призма П3,-ЦКЗ_2 мм) і порівняння з замірами (усередненими) мікроіндикаторів (Інд)

Експериментальні дані підтверджують, що розмір крапок у спекл-патерні має значний вплив на точність результатів. Найвища відповідність результатів вимірювань відмічена для зразка з крапками розміром 1 мм. Значення деформацій,

zareєстровані за допомогою ЦКЗ для цього зразка, відрізнялися від даних, записаних індикатором на 3.8 %. При розмірі крапок 1.5 мм ця різниця збільшилась до 12-14%, що також є прийнятним для інженерних цілей. Найбільша різниця між експериментальними даними, отриманими двома методами була для зразка бетону зі спеклом, що містить точки 2 мм, яке досягало значення 34%. Важливо відзначити, що діаграма ЦКЗ_2 мм (див. рис.2.13) охоплює ступені вищі стадії навантаження, ніж для зразків з меншими розмірами точок. Ймовірною причиною цього є те, що для цього зразка розвиток тріщин на стадії руйнування мав менший вплив на вимірювання ЦКЗ. Таким чином, хоча розмір точок 2 мм здається неприйнятним через високу похибку, невелика кількість більших точок у візерунку спеклів може дозволити реєструвати дані деформацій із застосуванням цифрової кореляції зображень на вищих етапах навантаження.

2.4. Методика випробування бетону, побудови повної діаграми деформування з низхідною віткою

Для отримання детальних міцнісних і деформативних характеристик бетону було проведено експериментальне випробування зразків бетону: 9-ти бетонних призм розмірами 600×150×150 мм (включно з 3-ма зразками з різними розмірами кореляційного спеклу,-див. розділ 2.4), 15-ти бетонних кубиків 150×150×150 мм згідно з вказівками ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Для виготовлення кубиків і призм використовували бетон того ж замісу, що й експериментальні балки. Вимірювання деформацій призм проводили з використанням методики цифрової кореляції зображень з паралельним записом механічними індикаторами (аналогічно до розділу 2.3). Для застосування технології ЦКЗ використано 2 камери “Grasshopper 3” фірми Flir (Канада) з об’єктивами Computar F25/2.8 та Canon EF 70-200MM F/2.8 L IS III USM, із наступними характеристиками:

- Модель камери- GS3-U3-91S6M-C (монохромна);
- Сенсор- CCD типу;
- Аналогово-цифровий конвертор 14-bit;

- Частотність- 9 кадрів;
- Розмір пікселей,- 3.69, мега-пікселі,-9.1;
- Розширення 3376×2704;
- Діапазон експозиції 0.040 мс- 32 с.

Загальний вигляд приладів, що використовувались в експериментальному дослідженні методикою ЦКЗ наведено на рис. 2.14.



а)



б)

Рис. 2.14. Загальний вигляд обладнання, використаний для заміру деформацій методикою ЦКЗ: а) загальний вигляд експериментальної установки; б) камери, що використовувались для реєстрації зображень

Для застосування технології цифрової кореляції зображень було створено спекл на досліджуваній поверхні призми за допомогою спеціально-розробленої методики. Спочатку поверхню бетону було ретельно очищено, зашліфовано і вирівняно до максимально гладкого стану. Після цього із застосуванням розчинника бетон знежирено. Оптимальні параметри кореляційного спеклу було прийнято згідно з результатами попередніх випробувань 3-х зразків з різними розмірами крапок (див. розд. 2.3). Загальна щільність прийнята в межах 50-60% при забезпеченні достатньої неоднорідності і контрастності; відсоткове співвідношення розмірів: 60 % розміром до 0.5-1 мм, 30 % - розміром 1-1.5 мм, 10 % - 1.5-2 мм. Поверхню бетону було спочатку пофарбовано водо-емульсійною не-еластичною

фарбою. Сам візерунок було створено чорною тушшю методом набризку щіткою і голкою. Для отримання крапок більшого розміру, щітку тримали спочатку на відстані 20 см від поверхні, після цього недостатньо заповнені зони доповнювали крапками меншого розміру, наблизивши щітку до поверхні на 10 см. Отриманий спекл-візерунок на бетонній поверхні наведено на рис. 2.15.

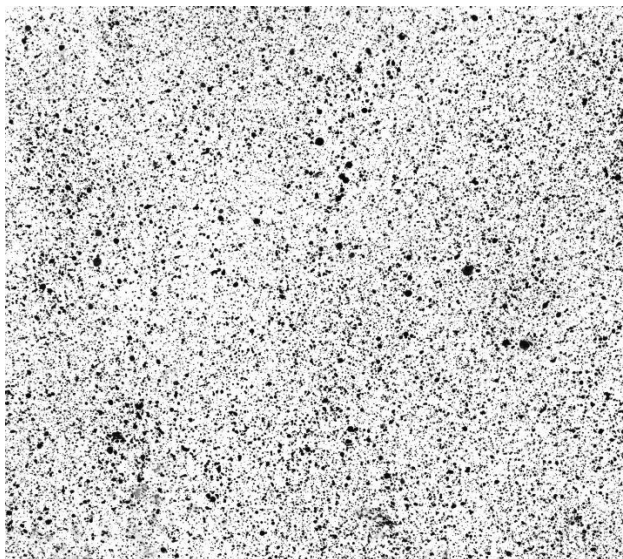


Рис. 2.15. Загальний вигляд підготованої поверхні для застосування методу ЦКЗ

Технологію ЦКЗ було перевірено на бетонних призмах, шляхом паралельного вимірювання суб-мікронним індикатором з ціною поділки 0.001 мм і базою 200 мм. Заміри деформацій виконано кожні 250 мс. Навантажували бетонні зразки гідравлічним пресом ПГ-250 (з максимальним навантаженням 250 тс), зі швидкістю, що забезпечувала підвищення розрахункового напруження в межах 0.6 ± 0.4 МПа/с. Метод цифрової кореляції зображень передбачав запис деформацій за допомогою двох камер кожні 250 мс. Запис змін навантаження в часі проводився третьою камерою із частотою 50 кадрів/сек. Протягом випробування використовувались дві світлодіодні лампи. Дані цифрової кореляції зображень, отримані експериментальними дослідженнями оброблялись за допомогою засобів спеціалізованого програмного забезпечення (ПК-VIC-2D-7). Випробування бетонних кубиків для визначення їх міцності на стиск проводили аналогічно до призм гідравлічним пресом ПГ-250 із безперервним навантаженням.

2.5. Матеріали і конструкція дослідних зразків

В експериментальних дослідженнях було використано зразки залізобетонних балок натурних розмірів $200 \times 100 \times 2100$ мм, виготовлених в заводських умовах. Схема армування зразків наведена на рис. 2.16. Конструктивний каркас складався із робочої арматури нижньої зони, конструктивного армування верхньої зони і поперечних U-подібних хомутиків. Хомути було виготовлено із арматури діаметром 6 мм класу A240C з кроком 75 мм в зонах дії поперечних зусиль (на довжину 825 мм). Армування верхньої зони, конструктивне і виконане з 2-х арматурних стержнів діаметром 6 мм класу A240C, розташованих на відстані 40 мм.

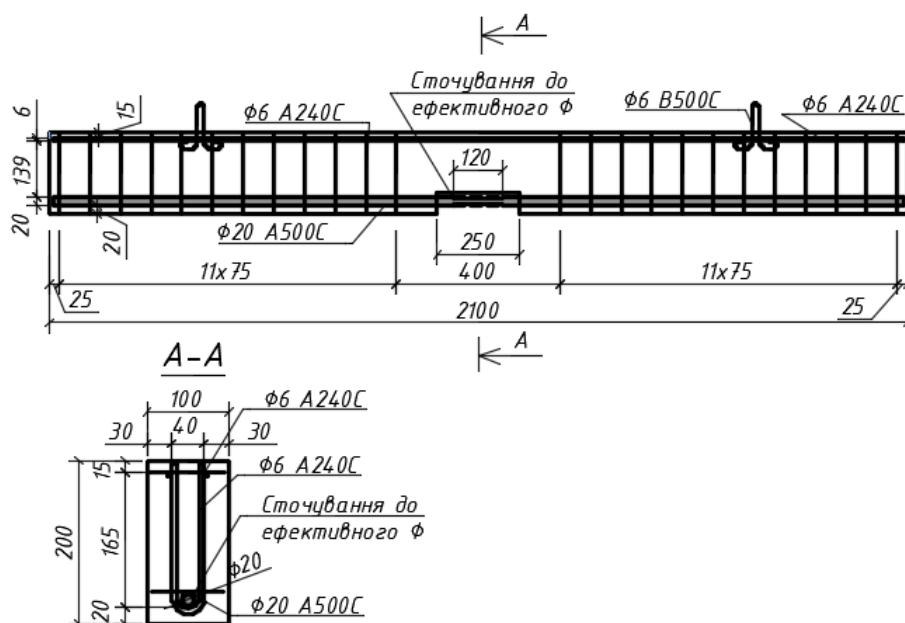


Рис. 2.16. Схема армування залізобетонних балок

Для армування нижньої зони балки як робочу використано арматуру з попередніх досліджень [8,10,73,141]. Робоча арматура виконана із термічно-зміцненого арматурного стержня діаметром 20 мм A500C, сточеного до певного діаметру (18,16,14,12 мм) на ділянці довжиною в 120 мм (див. рис. 2.17). Сточування арматури на певну товщину дозволило змодельювати різний ступінь корозійного пошкодження. Характеристики даної арматури було детально досліджено і описано в попередніх роботах [8,65,73,136,141], що усунуло необхідність в додаткових експериментальних випробуваннях арматурних стержнів. Відповідно, в даній роботі фізико-механічні характеристики арматури

прийнято за результатами попередніх досліджень [8]. Натомість, в цій роботі було розроблено регресійну модель на основі експериментальних даних, що дозволила описати зміну характеристик термічно-зміцненої арматури (див. Додаток В).



Рис. 2.17. Сточування робочої арматури для моделювання рівномірної корозії

Для з'єднання конструктивної арматури і поперечних хомутів в просторовий каркас використано контактне електродугове зварювання. Стержні робочої арматури Ø20A500С приєднали до просторового каркасу за допомогою конструктивних елементів- зв'язувальних хомутів. Наступним етапом після підготовки арматурних каркасів було встановлення їх в опалубку і бетонування. Для виготовлення балок було використано важкий бетон із складом, який описаний схемою на рис. 2.18.

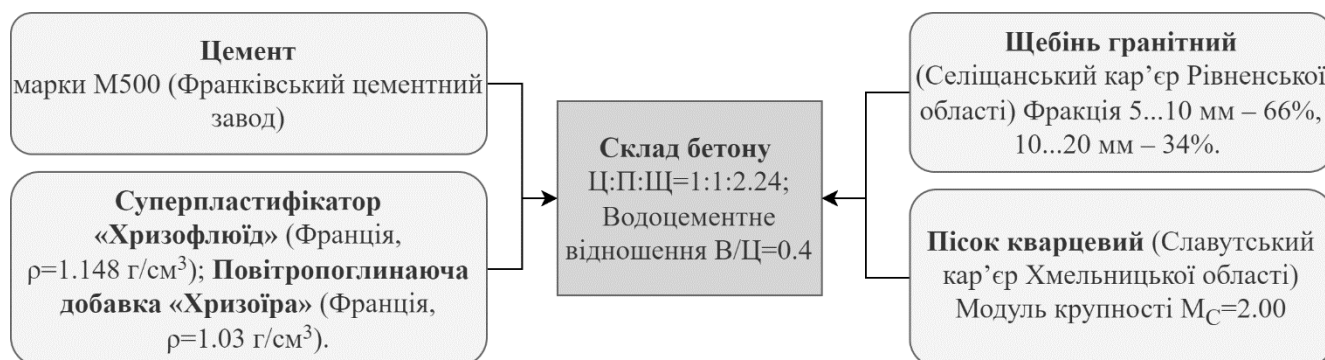


Рис. 2.18. Склад бетону, використаного для виготовлення дослідних зразків

Виготовлення зразків проводилось в заводських умовах в нормальних умовах (при температурі повітря +20 °С і відносній вологості близько 90%).

2.6. Методика підсилення залізобетонних балок карбоновими стрічками

Підсилення залізобетонних зразків виконувалось карбоною стрічкою Sika Carbodur S512 шириною 25 мм, за методом згідно з рекомендаціями виробника [21]. Стрічку наклеювали на нижню розтягнуту грань балки, забезпечуючи при цьому анкерування за допомогою заведення її за межі зони чистого згину на необхідну довжину, згідно з попередньо проведеним розрахунком (див. додаток Б). Додаткове анкерування було забезпечене наклеюванням спеціальної тканини SikaWrap шириною 300 мм (див. рис. 2.19). Анкерувальний матеріал наносився в 2 шари. Нижній шар огортав бокові вертикальні грані балки, поверх якого приклеювали карбонову стрічку і другий шар тканини SikaWrap.

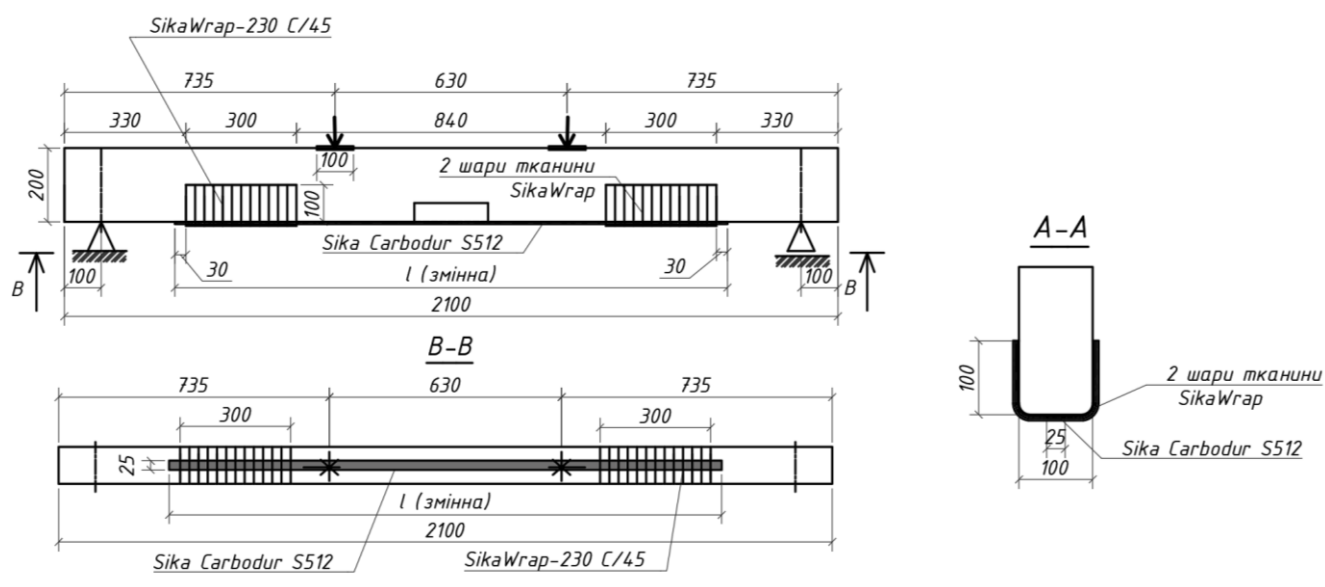


Рис.2.19. Схема дослідної балки, підсиленої композитною арматурою

Підготовка балок до підсилення передбачала такі етапи:

- сточування кутів балки шліфувальною машиною для отримання заокруглень радіусом близько 20 мм в зонах приклеювання полотна;
- зачищення поверхні балки металевою щіткою і наждачним папером;
- остаточне очищення поверхні промиванням водою і знежирення розчинником.

Така підготовка дозволила забезпечити ефективне зчеплення між бетонною поверхнею і композитною стрічкою. Безпосередньо перед приклеюванням першого шару SikaWrap виконувалась очистка поверхні за допомогою універсальної

очищувальної рідини Sika Colma Cleaner (Reiniger), час активації якої складав від 30 хв. Згідно із технічними вказівками виробника при сухому методі застосування як просочувальний клей для композитної тканини SikaWrap використано 2-компонентний епоксидний клей Sikadur -330. Епоксидний клей Sikadur -330 не містить розчинників, тиксотропний і складається з компонент А та В з пропорцією змішування $A:B=4:1$. Компоненти А+В змішувались протягом 5 хвилин електричною мішалкою на малій швидкості (до 300 об./хв) до утворення однорідної консистенції і кольору. При цьому не допускалось повітроутворення. Клей нанесено на бетонну поверхню за допомогою пензля і валика. Наступним етапом було накладання анкеруючого полотна SikaWrap-230 C/45, карбонові волокна було орієнтовано перпендикулярно до осі балки. За допомогою валиків полотно втискали в шар клею, доки не було досягнуто повного просочення всіх волокон тканини. Як матеріал для додаткового армування використано полтрузійно виготовлені полімерні стрічки SikaCarbodur-S512, армовані карбовими волокнами. Для приклеювання стрічок застосовано 2-компонентний тиксотропний епоксидний клей Sikadur-30 на основі епоксидної смоли і спеціальних заповнювачів. Клей змішувався за методикою, аналогічною до вище описаної для Sikadur -330, однак було витримано пропорцію компонентів $A:B=3:1$. Клей було нанесено на поверхню стрічку шпателем, після чого стрічку притискали валиком до нижньої грані балки, усуваючи залишки клею шпателем. Останнім етапом було нанесення другого шару анкерувальної тканини SikaWrap за технологією як для першого шару. На рис. 2.20 показано процес підсилення. Випробування балок проводилось після повного набору міцності (через 7 діб).

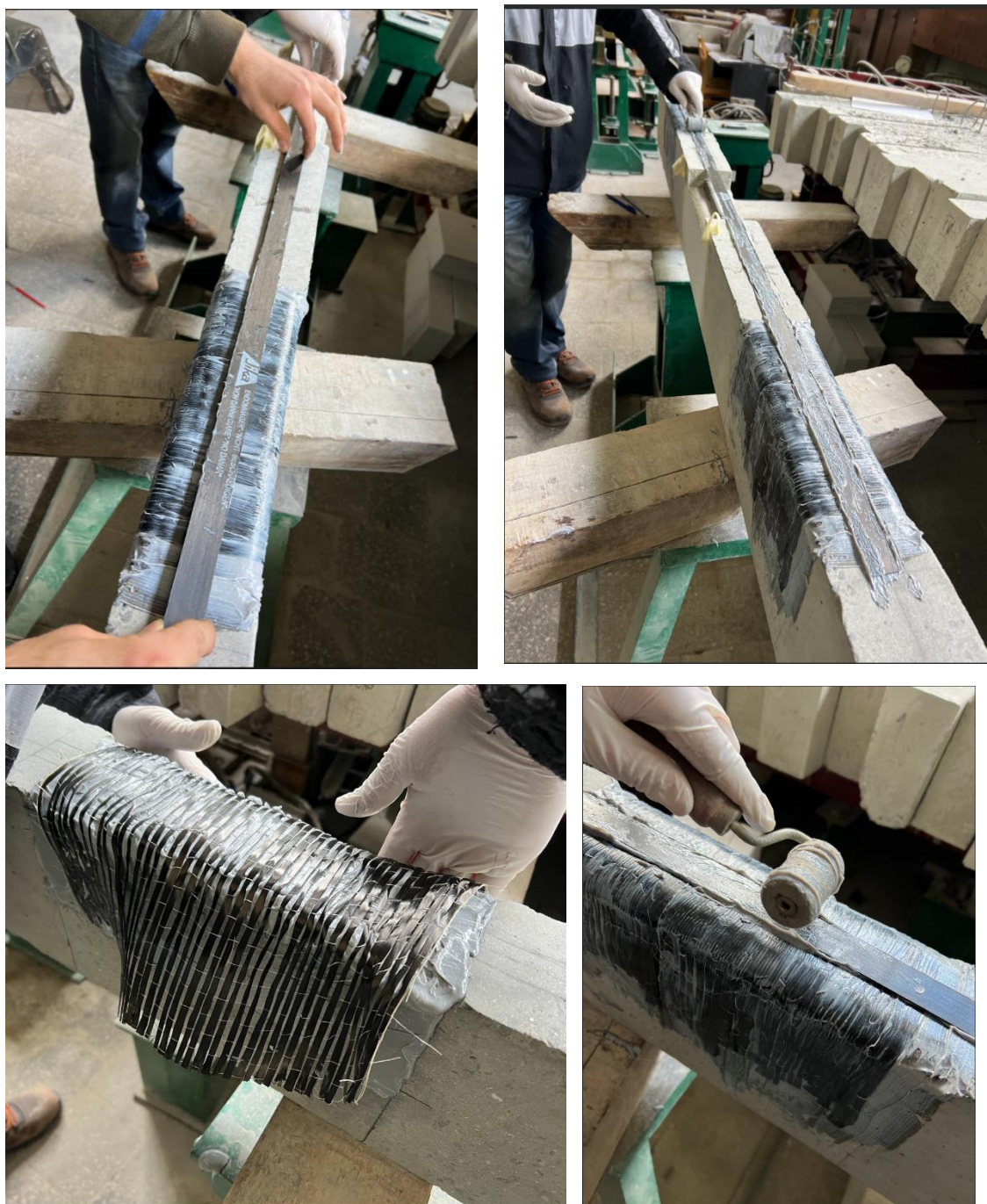
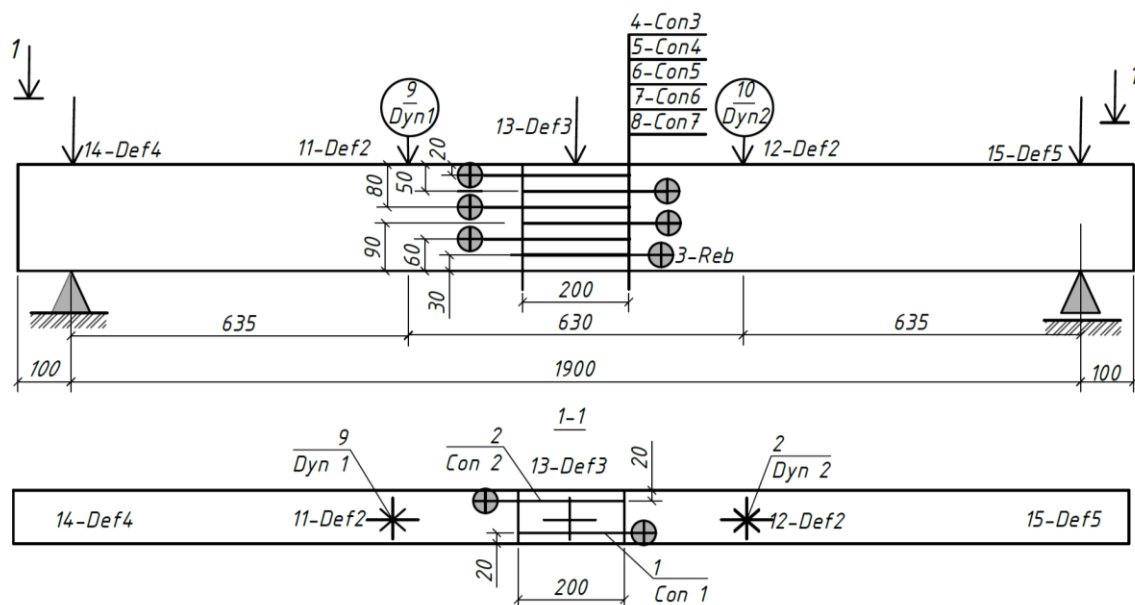


Рис.2.20. Процес підсилення залізобетонних балок композитними матеріалами.

2.7. Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок з використанням суб-мікронних індикаторів

Експериментально несучу здатність і деформативність залізобетонних балок визначали випробуванням на двоточковий згин короточасним навантаженням. Для цього балки встановлювали на спеціальний стенд і навантажували двома зосередженими силами в третинах прольоту. Навантаження прикладали за

допомогою гідравлічного домкрата через розподільчу траверсу. Схематичне зображення і загальний вигляд станда наведено на рис. 2.21.



а)



б)



в)

Рис.2.21: а) схематичне зображення випробувального станда і розміщення приладів (Con- для вимірювання деформацій бетону, Reb- для вимірювання деформацій арматури, Dyn-динамометри, Def-прогиноміри); б) загальний вигляд випробувального станда; в) розміщення суб-мікронних індикаторів.

Деформації бетону і арматури визначали за допомогою суб-мікронних комп'ютерних індикаторів з безконтактним передаванням даних Microtech. Індикатори розташовувались по висоті перерізу з кроком в 30 мм (5 штук); на верхній грані балки (2 індикатори),-для стиснутого бетону; індикатор на спеціальних механічних тримачах,-для розтягнутої арматури (див. рис.2.22, в). Для оцінки деформативності зразків було використано 5 суб-мікронних індикаторів: в місцях прикладання сил, на опорах і в центральному перерізі, якими замірялись прогини. Індикатори мали ціну поділки 1×10^{-4} , заміряли значення з похибкою в межах 13 мікрон і передавали їх через Bluetooth протокол на персональний комп'ютер (див. рис.2.22). Значення деформацій реєструвались з інтервалом в 30 с.



Рис.2.22. Приклад реєстрації даних деформацій і навантаження на персональний комп'ютер

Навантажували балки поступово з кроком, що складав 5% від розрахункової несучої здатності, при цьому витримка під навантаженням складала 5-10 хв для стабілізації показів.

2.8. Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок з використанням цифрової кореляції зображень

Паралельно з реєстрацією деформацій суб-мікронними індикаторами було застосовано метод цифрової кореляції зображень. Для цього попередньо було спеціально підготовано зразки згідно з принципами описаними в попередніх

розділах (див. п. 2.3-2.4). На бетонну поверхню було нанесено білий фон за допомогою білої водоемульсійної нееластичної фарби і набризком створено контрастний спекл необхідних параметрів: варіація 70%, наповненість 50-60% і розмір крапок 0.5-2 мм. Відповідний спекл було створено в зоні чистого згину, де очікувались найбільші деформації і напруження (рис.2.23, а). На арматуру було нанесено шар білої аерозольної фарби, після чого методом набризку створено контрастний спекл з крапок розміром 0.3-0.6 мм, дотримуючись густини заповнення в 50-60%. (рис.2.23, б).

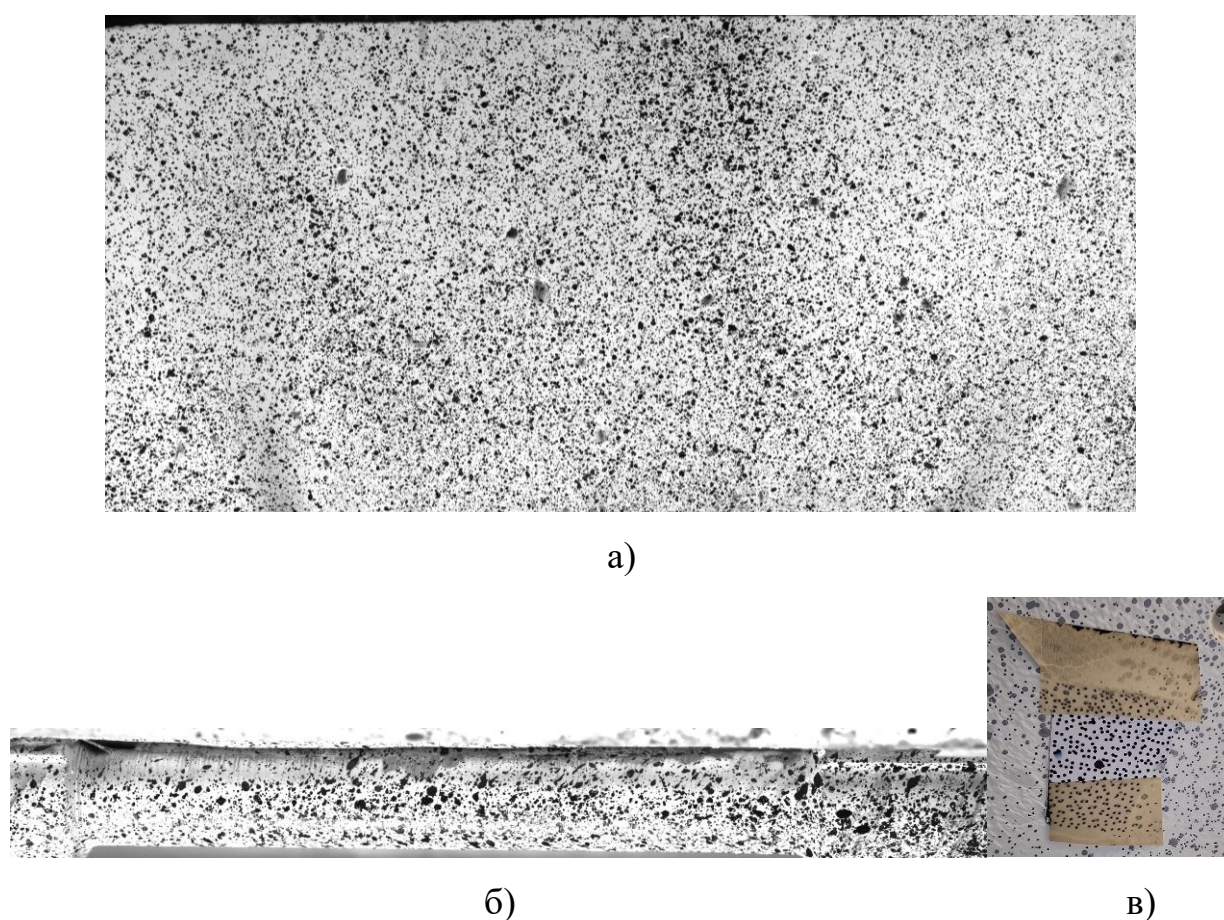


Рис.2.23. Загальний вигляд підготованої поверхні для застосування цифрової кореляції зображень: а)- на бетоні; б)- на арматурі; в)- приклад маркера для крос-валідації спекла.

Додатково на балках серії ПБ-1...ПБ-5 для фіксації деформацій стрічки було прикріплені штучні маркери з попередньо нанесеним спеклом оптимального розміру. Відповідні пари маркерів було зафіксовано на стрічці і на рівні найбільш стиснутої зони бетону, таким чином щоб забезпечити точковий контакт (рис.2.23,

в). Відносне зміщення в межах пари маркерів дозволяло провести крос-валідацію спекла, нанесеного на поверхню бетону, а зміщення в межах маркера приймалися як «нульові» для виначення і усунення можливих похибок (внаслідок коливань в освітленні, відхилень в перпендикулярності осі камери, тощо).

Замірювання деформацій виконувалось з використанням спеціального обладнання: 2 монохроматичні камери “Grasshopper 3” фірми Flir (Канада) з об’єктивом Computar F25/2.8. Камери було зафіксовано в проектних положеннях для максимального охоплення зон деформацій (див. рис. 2.24). Камера для реєстрації поверхні бетону була жорстко зафіксована на відстані 550 мм; чіткість, при діафрагмі об’єктиву в 1/5.6 одиниць. Деформації арматури записувались камерою з відстані 300 мм, діафрагму було налаштовано на 1/4 одиниці. Контрастність, чіткість і висока якість зображення була досягнута відповідними налаштуваннями в програмному забезпечення Fly Capture, шляхом ітераційного підбору налаштувань шутера, гамми, експозиції, тощо (див. рис. 2.25).



Рис.2.24. Розміщення камер і освітлення для фіксації деформацій методом ЦКЗ.

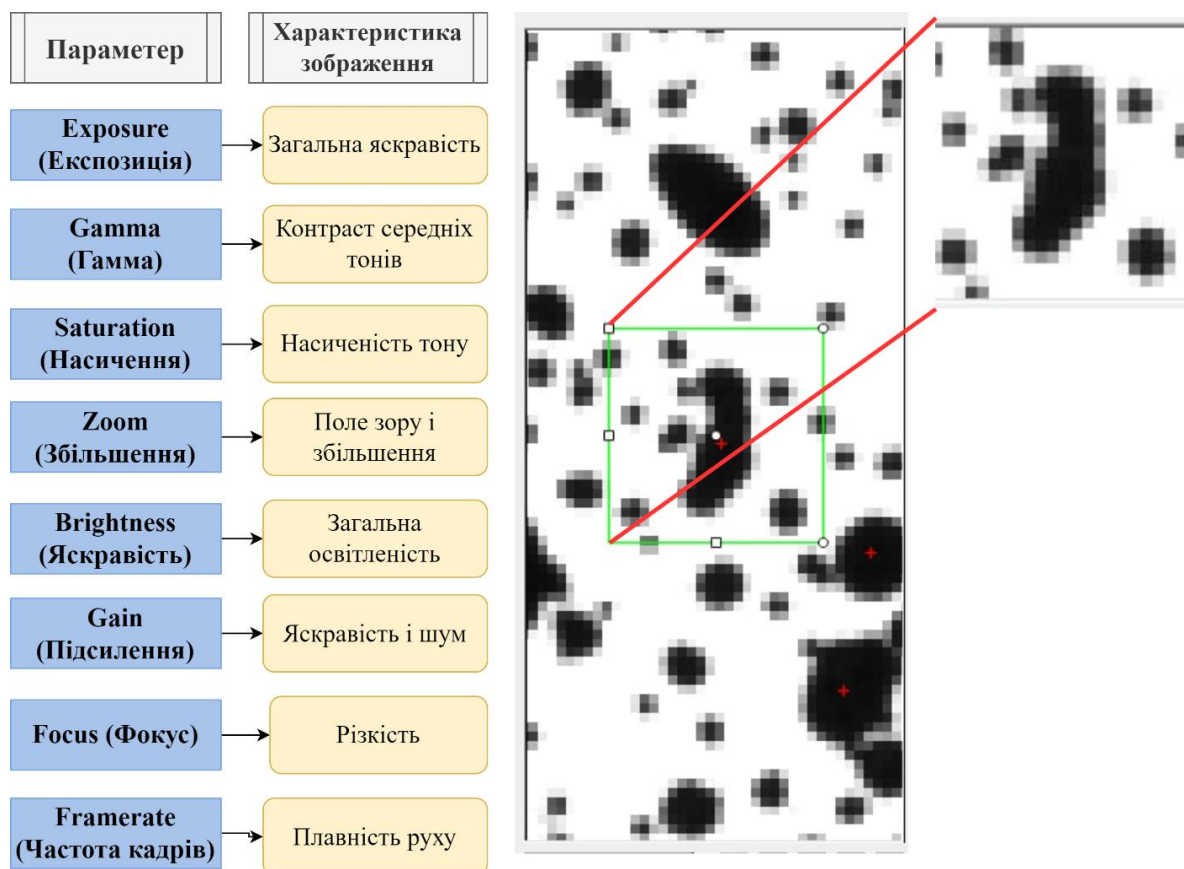


Рис.2.25. Налаштування параметрів камери для фіксації деформацій

Деформації бетону і арматури реєструвались відповідними камерами з інтервалом 100 мс і синхронно передавались на персональний комп'ютер в автоматичному безконтактному режимі для подальшого опрацювання спеціальним програмним забезпеченням VIC-2D-7.

2.10. Висновки до розділу 2.

В даному розділі було розроблено комплексну програму експериментальних досліджень, включно з наступним:

1. Визначено пріоритетні параметри для дослідження на основі факторного аналізу і складено оптимальний план експериментальних досліджень. Розроблено програму експериментальних досліджень 12 залізобетонних балок з термічнозміцненою арматурою Ø20 мм, пошкодженою до ефективного діаметра в діапазоні [18...12 мм], що дозволило змодельовати різний ступінь корозії.

2. Експериментальним шляхом визначено оптимальні параметри кореляційного спеклу і розроблено методику експериментальних випробувань бетонних призм із застосуванням методу цифрової кореляції зображень та суб-мікронних індикаторів.
3. Розроблено методику експериментальних випробувань залізобетонних балок із застосуванням паралельних вимірювань суб-мікронними індикаторами і цифровою кореляцією зображень, що дозволило в автоматизованому дистанційному режимі фіксувати деформації бетону і арматури, прогинів включно до етапу вичерпання несучої здатності і фізичного руйнування дослідних зразків.
4. Розроблено і апробовано методику підсилення залізобетонних балок карбоновою стрічкою Sika Carbodur S512 із забезпеченням необхідного анкерування і уникнення відшарування матеріалу підсилення.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Результати експериментальних досліджень бетону

Зразки бетону (кубики і призми) випробовувались для визначення фізико-механічних властивостей згідно з вказівками ДСТУ Б.В.2.7-214:2009 [20] на гідравлічному пресі ПГ-250 (з максимальним навантаженням 250 тс). Деформації бетонних призм замірювались паралельно з використанням мікроіндикаторів з точністю 0.001 мм і методом цифрової кореляції зображень. Методом ЦКЗ деформації записувались за допомогою двох камер кожні 250 мс, а навантаження в часі фіксувалось із частотою 50 кадрів/с. Відповідно, для синхронізації навантаження і деформацій було проведено розкадрування відео навантаження з частотою 4 кадри/секунду. Використання запропонованих методик дозволило побудувати повну діаграму руйнування бетону « σ - ϵ » з низхідною віткою, яку наведено на рис. 3.1 (усереднена для 6-ти призм).

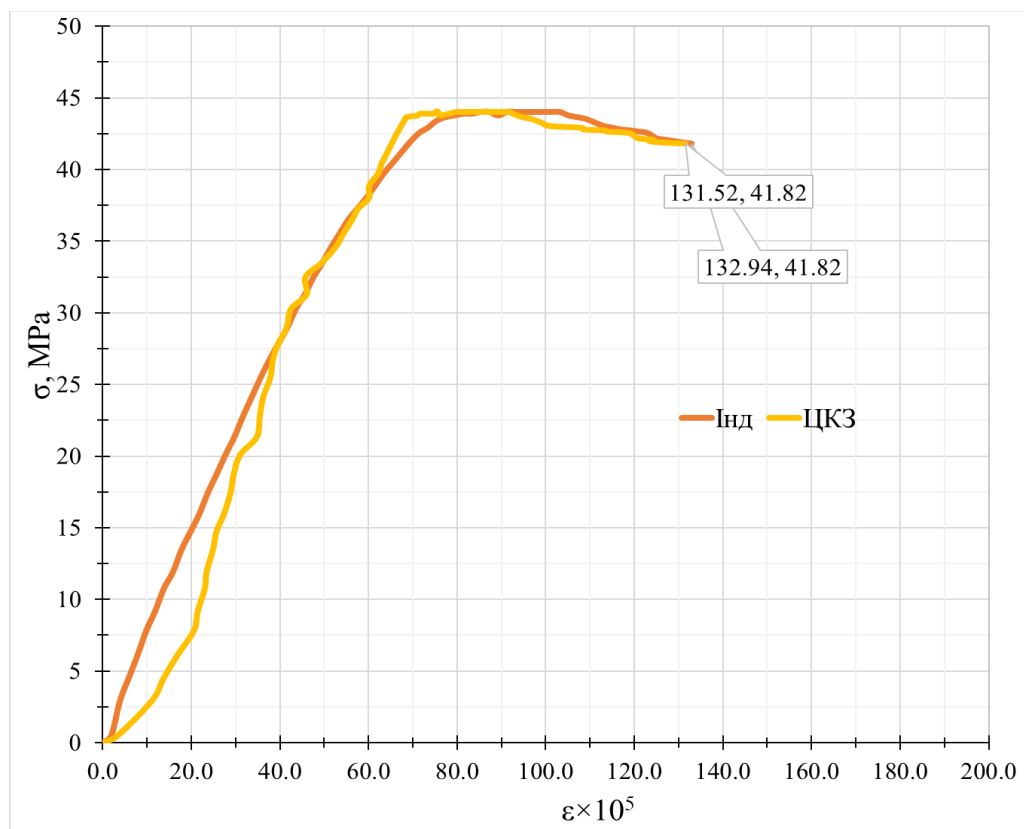


Рис.3.1. Повна діаграма руйнування бетону для зразків із оптимізованим спеклом (усереднена для призм П4-П9) за методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) і порівняння з замірами (усередненими) мікроіндикаторів (Інд)

Характер діаграм і також чисельні дані (див. табл.3.1) свідчать про значну узгодженість між значеннями деформацій, заміряними двома методами і відповідають значенням в нормативних документах. В табл. 3.1. наведені окремі експериментально заміряні значення відносних деформацій на найбільш характерних етапах навантаження призм. Зокрема, найбільші відхилення між двома методами можна відмітити на ранніх етапах навантаження (до 30% від руйнівного), причиною чого могли бути певні коливання в освітленні а також недостатня стабілізація показів. Різниця в експериментальних замірах на пізніших етапах була незначною (до 5 %), а на етапі руйнування не перевищувала 10%, що підтверджує що вибрана методика випробувань а також оптимізовані параметри кореляційного спеклу дозволяють аналізувати напружено-деформований стан бетону на пізніх етапах випробування.

Таблиця 3.1

Експериментально заміряні значення відносних деформацій бетонних призм за мікроіндикаторами і методом ЦКЗ (усереднені для 6 призм)

Напруження σ , МПа	Відносні деформації, $\varepsilon \times 10^5$		Відносна різниця, %
	Мікроіндикатор	Цифрова кореляція зображень	
1	2	3	4
10.79	13.89	23.12	39.91
20.11	27.78	31.09	10.66
26.73	37.70	38.44	1.93
28.94	41.67	41.50	0.40
32.50	47.62	45.77	4.03
38.01	59.52	60.09	0.95
42.55	71.43	66.47	7.46

Випробування бетонних кубиків для визначення їх міцності на стиск проводили аналогічно до призм гідравлічним пресом ПГ-250 із безперервним навантаженням. Експериментальним дослідженнями встановлено, що міцність бетону складала $f_{cm,cube}=47.8$ МПа (див.Таблиця 3.2), що відповідає класу бетону С32/40. При цьому середньоквадратичне відхилення в межах серії становило $S_m=0.57$ МПа і $V_c=1.19$ % згідно з [20].

Таблиця 3.2

Експериментально заміряні значення кубикової міцності бетонних кубиків

Зразок №	f_{ci} МПа	$\frac{f_{ci} - f_{c,cube}}{f_{c,cube}} \times 100$,%
1	2	3
1	48.5	-1.46
2	46.8	2.09
3	47.5	0.63
4	47.8	0.00
5	46.9	1.88
6	46.8	2.09
7	48.5	-1.46
8	47.7	0.21
9	47.8	0.00
10	48	-0.42
11	47.9	-0.21
12	48.6	-1.67
13	47.6	0.42
14	48	-0.42
15	48.2	-0.84

3.2. Результати експериментальних досліджень залізобетонних балок

3.2.1 Критерії вичерпання несучої здатності дослідних зразків залізобетонних балок

Підпрограма експериментальних досліджень передбачала випробування 12-ти залізобетонних балок, які було розділено на 6 серій (КБ-0, ПБ-1, ПБ-2, ПБ-3, ПБ-4, ПБ-5) залежно від ступеня сточування робочої арматури розтягнутої зони, що дозволило змодельовати різний початковий рівень корозії арматурних стержнів (див. Табл.2.4). Зразки було запроєктовано таким чином, щоб забезпечити їх руйнування в зоні чистого згину за нормальним перерізом. Згідно із нормативними документами [14,19] серед критеріїв вичерпання несучої здатності зразків контрольної серії (без підсилення) розглядаємо наступні:

- досягнення максимуму на діаграмах «момент-кривизна (прогин)» або «момент – деформація бетону найбільш стиснутої фібри», які свідчать про втрату рівноваги між зовнішніми і внутрішніми зусиллями;
- руйнування бетону в стиснутій зоні при досягненні в найбільш стиснутих фібрах бетону граничних значень (ϵ_{cu1} , ϵ_{cu3});
- розрив арматурних стержнів в розтягнутій зоні після досягнення деформацій в них граничного рівня (ϵ_{ud}).

Для решти зразків, підсилених композитними стрічками згідно з [21,14,19] можна виділити наступні критерії вичерпання несучої здатності:

- руйнування бетону в стиснутій зоні при досягненні в найбільш стиснутих фібрах бетону граничних значень (ϵ_{cu1} , ϵ_{cu3}), при цьому арматурні стержні можуть досягнути межі текучості і зусилля розтягу сприймаються композитними стрічками;
- досягнення деформаціями в арматурних стержнях розтягнутої зони межі текучості, після чого зусилля розтягу сприймаються композитними стрічками до їх розриву без руйнування бетону стиснутої зони;
- порушення сумісної роботи композитних стрічок і залізобетонних балки через відшарування стрічок;
- руйнування бетону стиснутої зони без досягнення текучості сталевих арматур.

Також при аналізі напружено-деформованого стану залізобетонних балок було прийнято наступні припущення і гіпотези [21,14,19]:

- вважатимемо, що для всіх балок виконується гіпотеза плоских перерізів (про лінійний розподіл деформацій по висоті перерізу);
- взаємозалежність між напруженням та деформаціям в арматурі має форму дволінійної діаграми;
- розрахунковим перерізом з найбільшими деформаціями прийнято центральний;
- деформації арматури і прилеглого до неї бетону приймаємо однаковими.

3.2.1. Несуча здатність і деформативність контрольних зразків (непошкоджених і непідсилених, КБ-0)

Серія КБ-0 (зразки КБ-0-1 і КБ-0-2) запроектовано як контрольні зразки, без пошкодження і без підсилення композитними стрічками. Для зразків фіксувались момент настання текучості основної арматури M_r^{exp} і момент вичерпання несучої здатності M_d^{exp} . Деформації бетону в контрольних зразках замірювались паралельно суб-мікронними індикаторами і цифровою кореляцією зображень (ЦКЗ), а сталевій арматурі-індикатором, що був закріплений на спеціальних тримачах. Згідно з замірами субмікронних індикаторів, робоча арматура в контрольних балках досягнула межі текучості при згинальному моменті $M_r^{\text{exp}} = 19.79 \text{ кНм}$ і 19.95 кНм для 2-х зразків серії відповідно. Значення межі текучості для даного класу арматури (Ø20A500C) було прийнято згідно з випробуваннями, проведеними в межах поперених досліджень як $\varepsilon_{yk} = 2.84 \cdot 10^{-3}$ [8,10,73,141]. Усереднений графік деформацій арматури в координатах «згинальний момент-відносні деформації» («М- $\varepsilon \times 10^3$ ») для балок серії КБ-0 наведені на рис. 3.2.

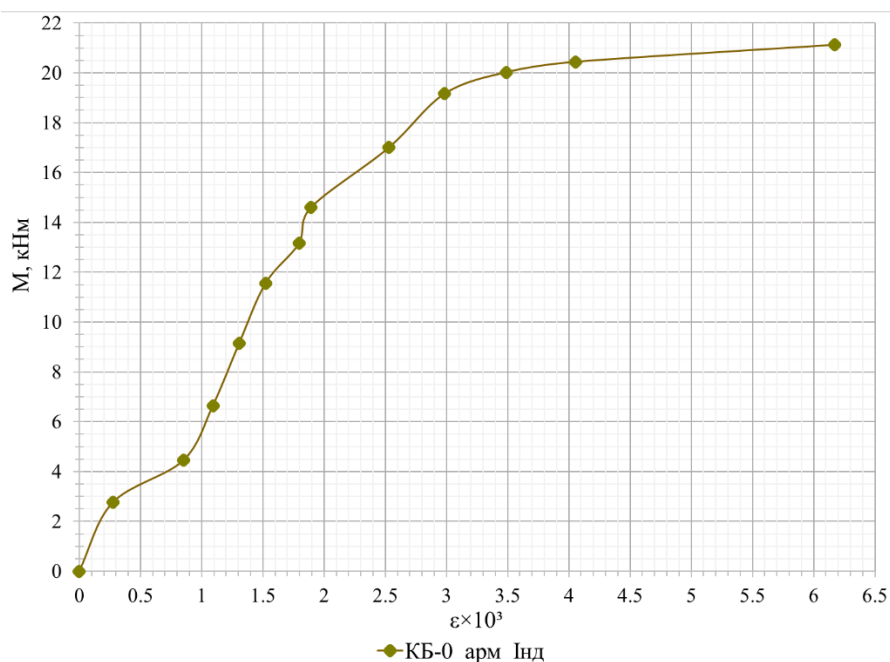


Рис.3.2. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації сталевій арматурі» для балок серії КБ-0, заміряні суб-мікронними індикаторами (КБ-0_арм_Інд)

Для всіх зразків графіки наведені за кінцевими деформаціям кожного етапу навантаження.

Після досягнення межі текучості арматури спостерігали зростання деформацій з стиснутому бетоні (див. рис. 3.3) до досягнення граничних значень, які для цього класу бетону становлять $\varepsilon_{cu1}=3 \cdot 10^{-3}$. Відповідно, моменти вичерпання несучої здатності M_d^{exp} для балок серії КБ-0 складали 21.02 і 21.31 кНм згідно з субмікронними індикаторами та 21.92 і 21.15 кНм, згідно з замірами ЦКЗ (див. табл. 3.3). Як бачимо, похибка результати різниця в результатах замірів різними методами не перевищує 2%, що свідчить про оптимально розроблену методику експериментальних досліджень. Оскільки відхилення між зразками в межах серії графіки деформацій і прогинів наводимо усереднені для 2-х балок.

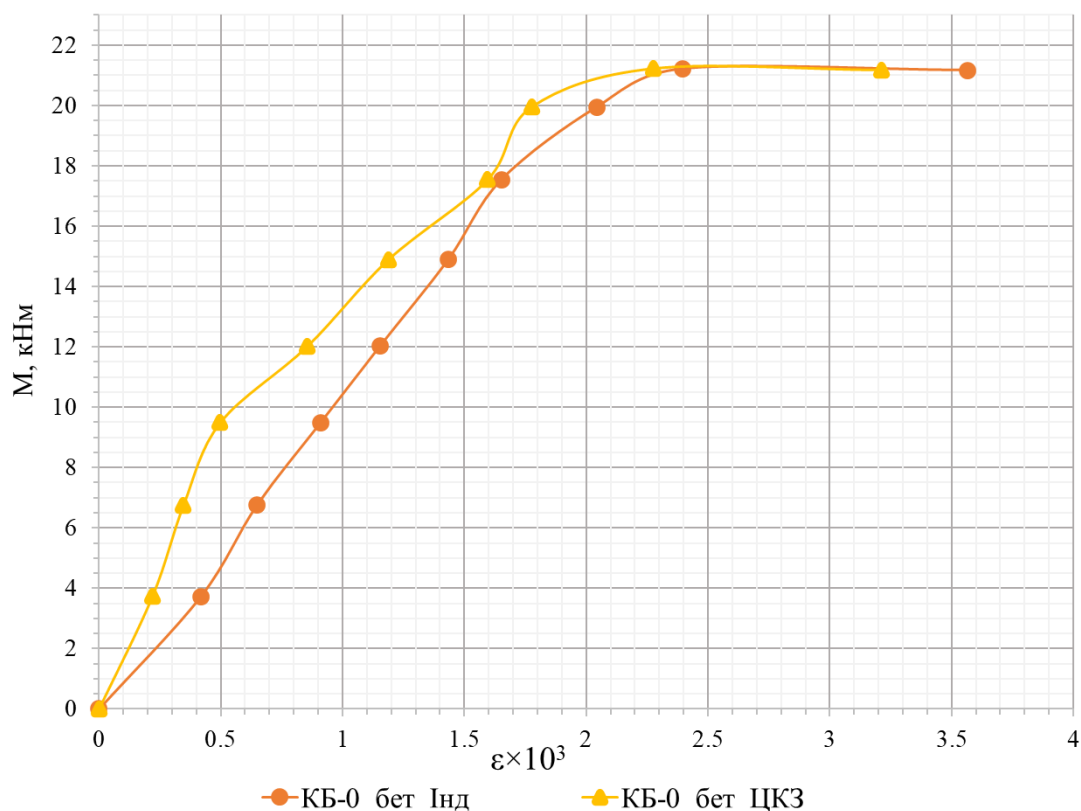


Рис.3.3. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації стиснутого бетону» для балок серії КБ-0, заміряні методом ЦКЗ (КБ-0_бет_ЦКЗ) і суб-мікронними індикаторами (КБ-0_бет_Інд)

Протягом проведення експерименту замірювались прогини в центральному перерізі (максимальний), а також контролювалась просідання опор. Граничний

прогин визначали згідно з ДСТУ Б В.1.2-3:2006 «Прогини і переміщення» методом інтерполяції і для всіх дослідних зразків при їх прольоті 1900 мм він складав 14.23 мм. Для обох контрольних зразків максимальний прогин не перевищив граничних меж і усереднені (для 2-х балок в серії) значення склали $f_{\max}^{\text{exp}} = 12.14$ і 12.57 мм при замірі індикаторами і методом ЦКЗ, відповідно (див. рис.3.4). Для обох зразків максимальний прогин був заміряний на етапі вичерпання несучої здатності в момент кришення стиснутої зони бетону (див. табл. 3.4).

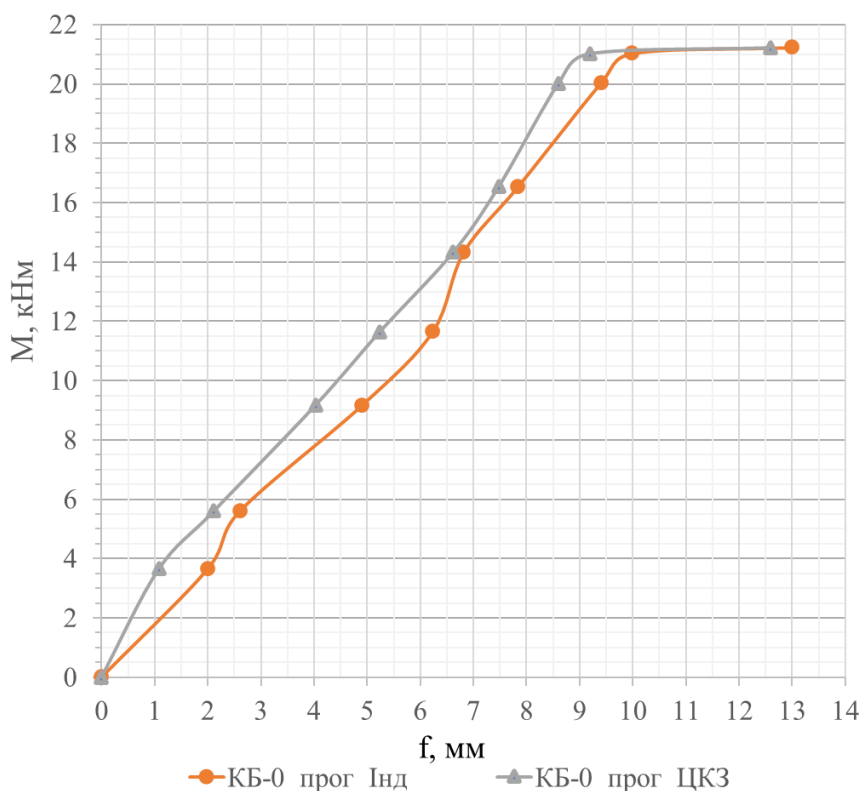


Рис.3.4. Усереднені експериментальні графіки «момент - прогин» для балок серії КБ-0, заміряні методом ЦКЗ (КБ-0_прог_ЦКЗ) і суб-мікронними індикаторами (КБ-0_прог_Інд)

3.2.2. Несуча здатність і деформативність підсилених зразків без пошкодження (серія 1)

Зразки серії 1 було запроектовано таким чином, щоб оцінити ефект застосування композитного підсилення для залізобетонних балок без пошкоджень. Відповідно, зразки серії ПБ-1 (ПБ-1-3 і ПБ-1-4) містили непошкоджену робочу

арматуру Ø20A500C (аналогічно до балок серії КБ-0) і були підсиленні стрічками Sika Carbodur-S512 шириною 25 мм і товщиною 1.2 мм, згідно з методикою, описаною в попередніх розділах. Для забезпечення сумісної роботи композитної арматури і бетону аж до моменту руйнування композитну стрічку було заведено за зону дії максимального згинального моменту на необхідну довжину анкерування (див. Додаток Б) і додатково використовувалась анкерувальне полотно SikaWrap-230 C/45.

Аналогічно до контрольних зразків протягом випробування для зразків фіксувались момент настання текучості основної арматури M_r^{exp} , що відповідав навантаженню, при якому арматура досягає межі текучості ($\epsilon_{yk}=2.84 \cdot 10^{-3}$) і момент вичерпання несучої здатності M_d^{exp} . Заміри деформацій бетону виконували паралельно суб-мікронними індикаторами і методом ЦКЗ. В зоні стиснутого бетону було також закріплено штучні маркери з метою: (1) для крос-валідації деформацій, заміряних за кореляційним спеклом; (2) фіксації нульових значень і нівелювання похибок через зовнішні впливи. На композитну стрічку наблизком було нанесено кореляційний спекл для замірювання деформацій методом ЦКЗ.

Як бачимо з графіків « $M-\epsilon \times 10^3$ » (усереднені для 2-х зразків серії ПБ-1) основної арматури і композитної стрічки, момент, що відповідав початку текучості в основній арматурі M_r^{exp} , згідно з ЦКЗ становив 28.04 і 28.98 кНм для 2-х зразків, відповідно (див.рис.3.5), а за індикаторами,- 27.94 і 28.96 кНм. Відхилення між зразками в серії не перевищувало 4%, а між усередненими результатами за 2 методами,- 1%, що свідчить про достатню точність. Оскільки безпосередньо до робочої арматури не було доступу для замірювання її деформацій методом ЦКЗ, було також побудовано графік деформацій на бетонній поверхні на рівні розміщення арматури (ПБ-1_арм_ЦКЗ, рис.3.5). Деформації стрічки протягом всіх етапів навантаження були сумісні зі сталевією арматурією, при цьому максимальні деформації в стрічці (усереднений результат для 2-х зразків) досягнули позначки $\epsilon_f=3.79 \times 10^{-3}$, що складає 76 % від граничних значень згідно з FIB Bulletin No. 56 (Model Code 2010) [101] і Fib Bulletin 90 [102] (де при бетоні класу C35/45 (і нижче)

граничні деформації складають $\varepsilon_{fu}=5\times 10^{-3}$). Згідно із значеннями, регламентованими виробником композитних матеріалів Carbodur S512 (згідно з [21] $\varepsilon_{fu}=13\times 10^{-3}$), ресурс стрічки використано на 29 % (див. табл.3.5).

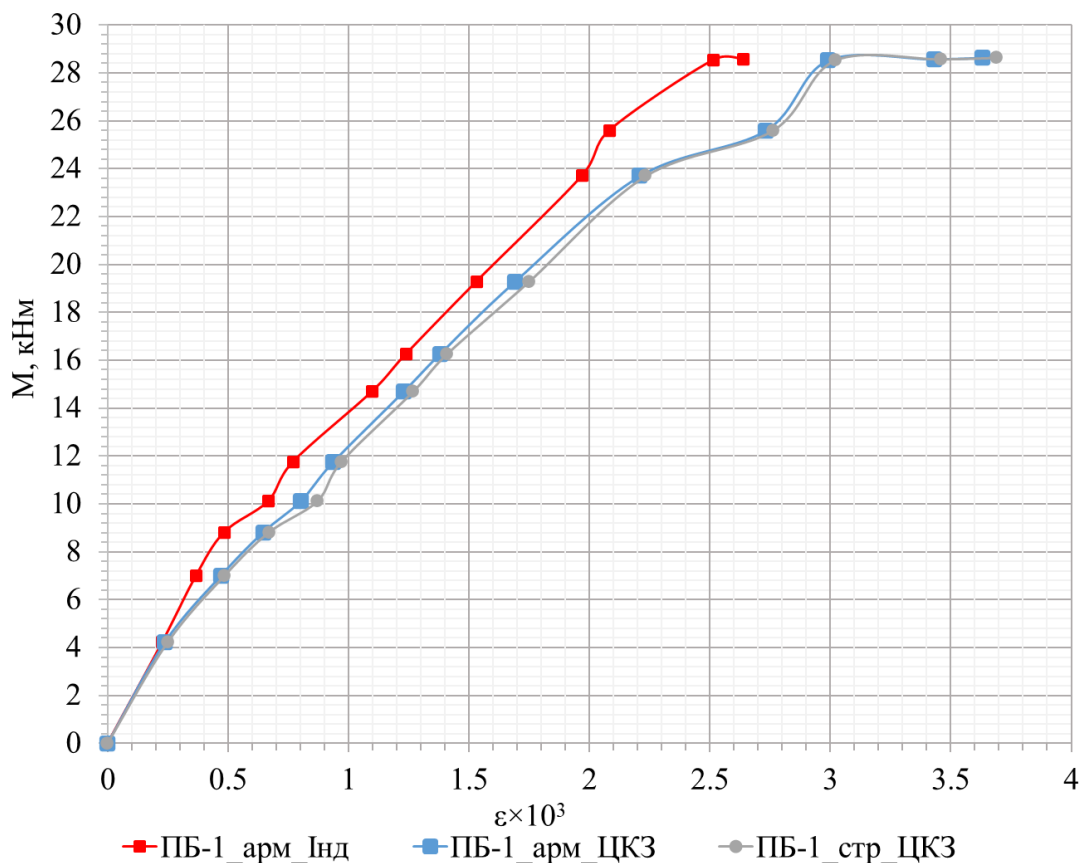


Рис.3.5. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації арматури» для балок серії ПБ-1, заміряні суб-мікронними індикаторами для сталевोї арматури (ПБ-2_арм_Інд), методом ЦКЗ на рівні сталевої арматури (ПБ-1_арм_ЦКЗ), заміряні методом ЦКЗ для стрічок (ПБ-1_стр_ЦКЗ)

Після початку текучості арматури спостерігалось різке зростання деформацій в найбільш стиснутих фібрах бетону, що в подальшому призвело до руйнування бетону стиснутої зони (див. рис.3.6). Важливо відмітити, що попри те, що моменти вичерпання несучої здатності зразків згідно з 2-ма методами є дуже близькими (різниця між усередненими значеннями менше 1.5%, (див. табл. 3.3), метод ЦКЗ дозволив відслідковувати деформації навіть протягом безпосереднього руйнування зразків. Графіки деформацій наочно демонструють особливість і перевагу безконтактних методів в моніторингу конструкцій на пізніх етапах руйнування,

тоді як традиційні підходи (наприклад, індикатори) не дозволяють вимірювати деформації після початку кришення поверхні. Співставлення результатів ЦКЗ при використанні кореляційного спеклу і штучних маркерів підтвердило, що обидва підходи демонструють дуже близькі результати з незначними відхиленнями на етапі безпосередньо руйнування. Крім того, було проведено «нульову перевірку» шляхом визначення деформацій в межах маркера, яка підтвердила відсутність додаткових джерел похибок через зовнішні фактори.

В порівнянні з балками контрольної серії КБ-0 загальною несучою здатністю збільшилась на 34 % (при досить близьких результатах за 2-ма методами).

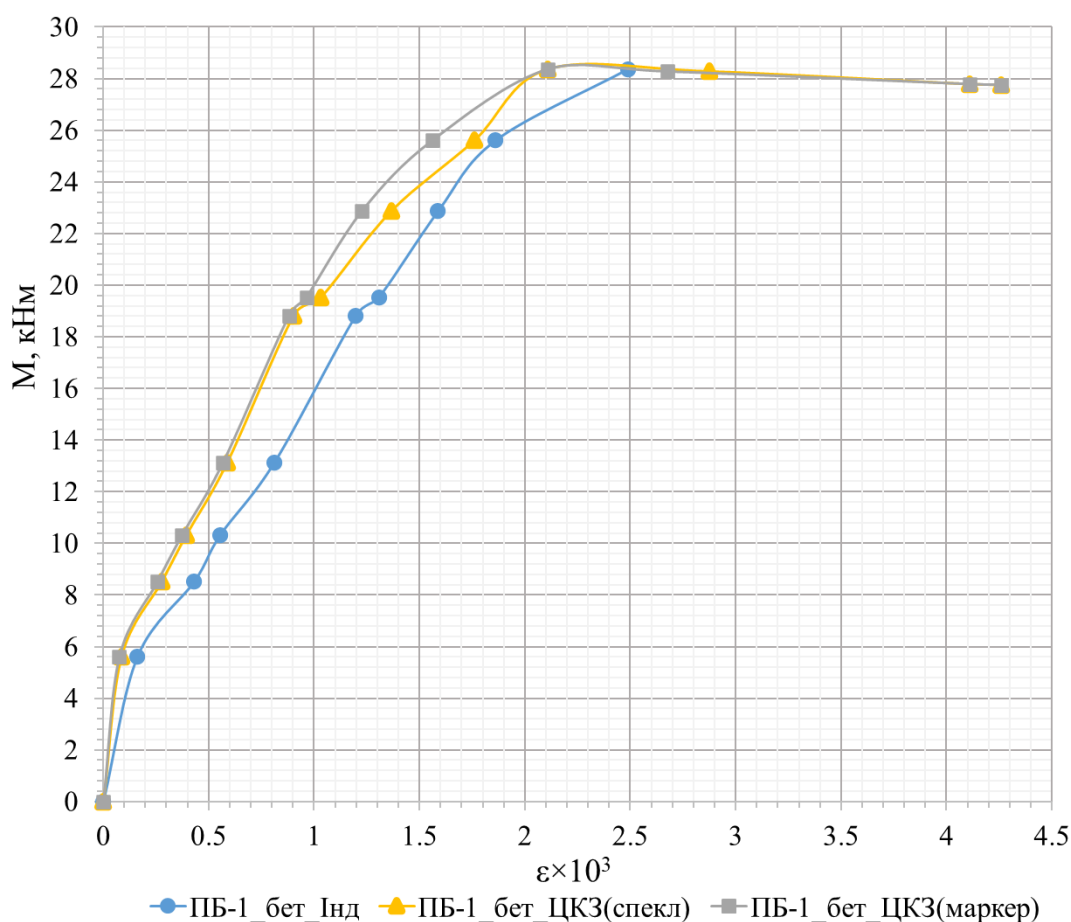


Рис.3.6. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації бетону» для балок серії ПБ-1, заміряні суб-мікронними індикаторами (ПБ-1_бет_Інд), заміряні методом ЦКЗ з використанням маркерів (ПБ-1_бет_ЦКЗ (маркер)), з використанням кореляційного спеклу (ПБ-1_бет_ЦКЗ (спекл))

Також на всіх етапах навантаження центральним прогиноміром проводили заміри прогинів в зоні чистого згину (усереднені значення для зразків серії ПБ-1 наведено на рис. 3.7).

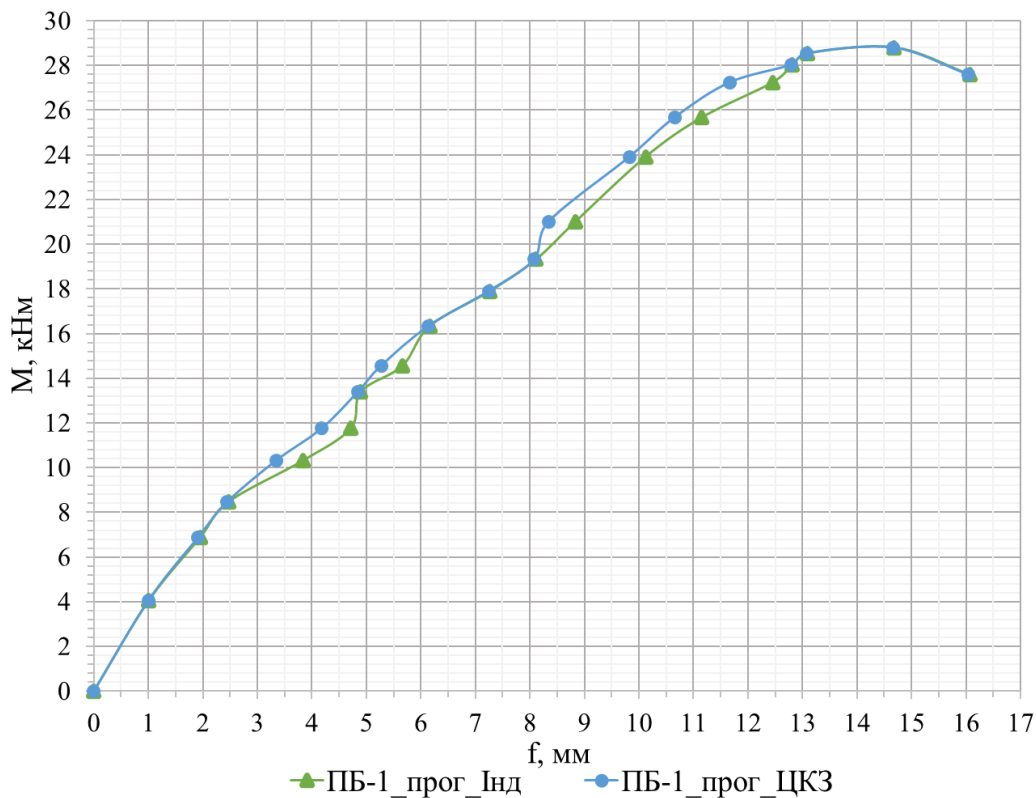


Рис.3.7. Усереднені експериментальні графіки «момент - прогин» для балок серії ПБ-1, заміряні методом ЦКЗ (ПБ-1_прог_ЦКЗ) і суб-мікронними індикаторами (ПБ-1_прог_Інд)

На етапі вичерпання несучої здатності (початок кришення бетону стиснутої зони) заміряні значення прогинів становили за індикаторами, $f_u = 12.89$ мм (усереднені), а за ЦКЗ, $f_u = 12.4$ мм (усереднені), з різницею на 4%. Для балок цієї серії обидва методи дозволили продовжувати заміри прогинів до максимальних значень $f_{\max} = 16.01$ мм за індикаторами і 16.4 мм за ЦКЗ (усереднене). В порівнянні із контрольними зразками КБ-0 збільшення максимальних прогинів $f_{\max}$ на 30.46%. (див. табл. 3.4).

3.2.3. Несуча здатність і деформативність зразків з пошкодженнями серій 2-5

В зразках серій 2, 3, 4 і 5 було виконано пошкодження робочої арматури Ø20 A500C шляхом сточування її до різного ефективного діаметра на довжині 120 мм, що дозволило змодельовати різні стадії корозії. Корозія арматури призводить до утворення продуктів корозії (окислів заліза, вторинного еtringіту), які мають більший об'єм, ніж оригінальний метал. Це збільшення об'єму створює внутрішній тиск на бетон навколо арматури, який спричиняє розтягувальні напруження в бетоні, що призводить до утворення тріщин і, в кінцевому підсумку, до розриву бетону. Крім того, продукти корозії заповнюють мікропори і шорсткості на поверхні арматури, зменшуючи механічне зчеплення між арматурою і бетоном, пришвидшуючи відрив прилеглого бетону. Для того щоб змодельовати це явище на ділянці в 200 мм в центральній зоні було видалено ділянку бетону на висоту 30 мм від нижньої грані (в зоні прилеглої до сточеної арматури), що, крім того, дозволило використати метод цифрової кореляції зображень для фіксації деформацій арматури. Виріз було виконано в розтягнутій зоні, що не вплинуло на несучу здатність і деформативність зразків. Залізобетонні балки 2, 3, 4 і 5-ї серій було підсилено композитними стрічками Sika Carbodur-S512 шириною 25 мм і товщиною 1.2 мм, згідно з методикою, описаною в попередніх розділах. Для забезпечення сумісної роботи композитної арматури і бетону аж до моменту руйнування композитну стрічку було заведено за зону дії максимального згинального моменту на необхідну довжину анкерування (див. додаток Б) і додатково використовувалась анкерувальне полотно SikaWrap-230 C/45.

Аналогічно до попередніх серій для зразків фіксувались момент настання текучості основної арматури M_r^{exp} , що відповідав навантаженню, при якому арматура досягає межі текучості ($\varepsilon_{yk}=2.84 \cdot 10^{-3}$) і момент вичерпання несучої здатності M_d^{exp} . Заміри деформацій бетону і основної арматури виконували паралельно суб-мікронними індикаторами і методом ЦКЗ. В зоні стиснутого бетону було також закріплено штучні маркери, аналогічно до серії ПБ-1. Деформації стрічки замірювались за допомогою спеціальних маркерів закріплених

на стрічці. В окремих зразках на стрічку також було нанесено кореляційний спекл набризком, з метою перевірки деформацій заміряних за маркерами.

В зразках ПБ-2-5 і ПБ-2-6 з 2-ї серії було виконано пошкодження робочої арматури Ø20 A500С шляхом сточування її до Ø18 мм на довжині 120 мм, що дозволило змодельовати початковий ступінь корозії. Графіки деформацій (усереднені для 2-х зразків серії) основної арматури і композитної стрічки в координатах « $M-\varepsilon \times 10^3$ » для балок серії ПБ-2 наведені на рис. 3.8.

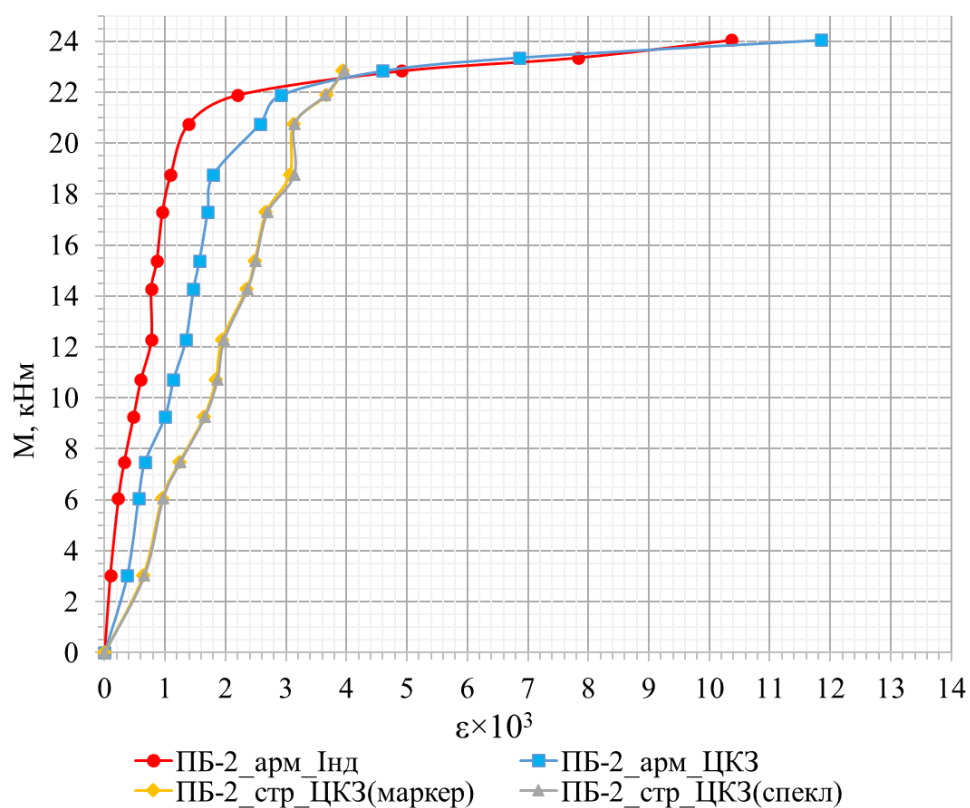


Рис.3.8. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації арматури» для балок серії ПБ-2, заміряні методом ЦКЗ для сталеві арматури (ПБ-2_арм_ЦКЗ), суб-мікронними індикаторами для сталеві арматури (ПБ-2_арм_Інд), заміряні методом ЦКЗ з використанням маркерів для стрічок (ПБ-2_стр_ЦКЗ (маркер)), з використанням кореляційного спеклу для стрічок (ПБ-2_стр_ЦКЗ (спекл))

Момент, що відповідав початку текучості в основній арматурі M_r^{exp} , заміряний методикою ЦКЗ становив 22.01 і 21.05 кНм для 2-х зразків відповідно. Індикаторами було заміряне різке зростання деформацій і початок текучості

арматури при моментах 22.46 і 21.30 кНм. Відхилення між двома методиками не перевищує 2 % (згідно з усередненими значеннями для серії), що є незначною похибкою для інженерних задач.

Як видно з графіка на рис.3.8 деформації стрічки до початку текучості арматури деформації стрічки мали схожий з нею характер, а на пізніших етапах всі зусилля розтягу передавались на стрічку, яка стримувала деформації в розтягнутій зоні зразків. Також варто відмітити, що деформації стрічки згідно з маркерами і спеклом були ідентичні до 90% від руйнівного навантаження, що підтверджує доцільність використання обох підходів. Загалом, максимальні деформації в стрічці (усереднений результат для 2-х зразків) досягнули позначки $\epsilon_f = 3.8 \times 10^{-3}$, що складає 76 % використання ресурсу композитного матеріалу згідно з FIB Bulletin No. 56 (Model Code 2010) [101] і Fib Bulletin 90 [102], де при бетоні класу C35/45 (і нижче) граничні деформації складають $\epsilon_{fu} = 5 \times 10^{-3}$. При зіставленні з показниками, що регламентує виробник композитних матеріалів Carbodur S512 (згідно з [21] $\epsilon_{fu} = 17 \times 10^{-3}$), ресурс стрічки використано на 29 % (див. табл.3.5).

Після початку текучості арматури спостерігалось різке зростання деформацій в найбільш стиснутих фібрах бетону, що в подальшому призвело до руйнування бетону стиснутої зони (див. рис.3.9). Аналогічно до поперенької серії, можна відзначити більший діапазон деформацій який дозволив заміряти метод ЦКЗ (навіть протягом безпосереднього руйнування зразків), при тому що, різниця між моментами вичерпання несучої здатності не перевищила 1%.

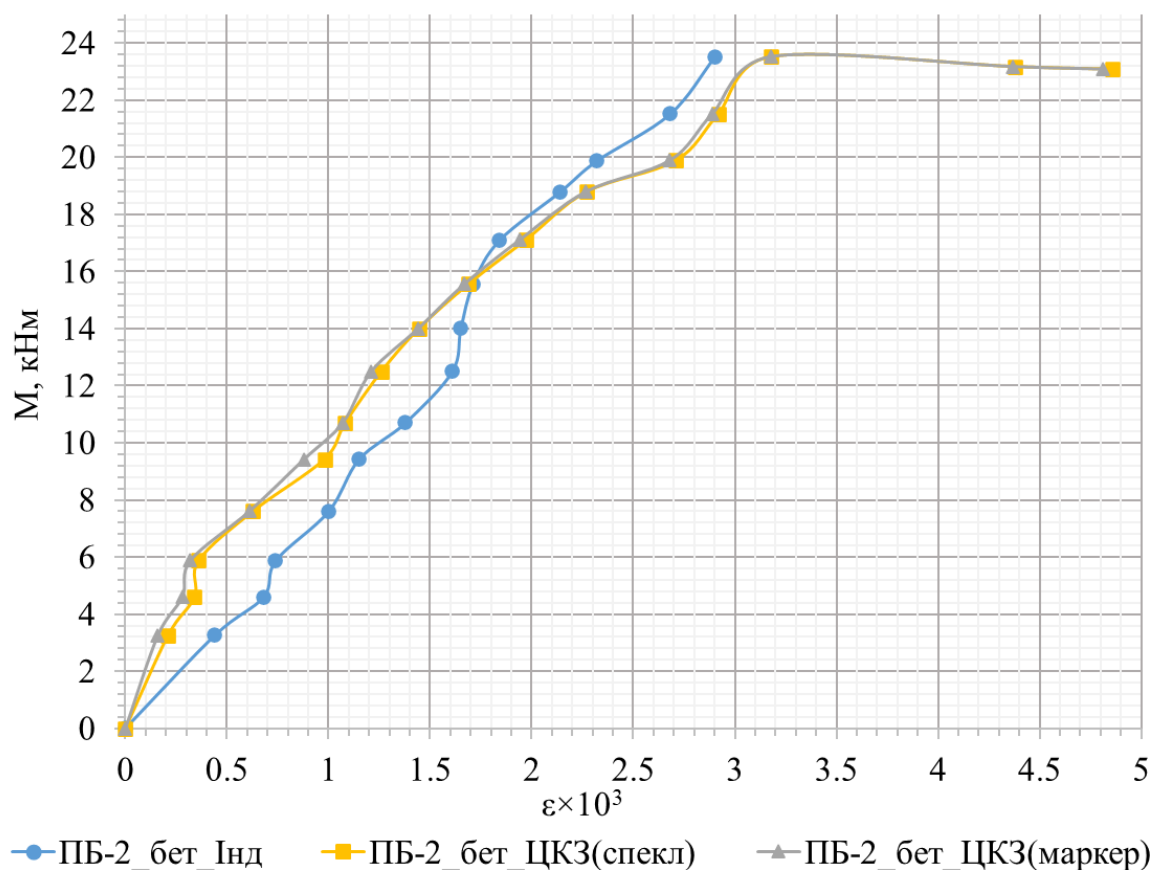


Рис.3.9. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації бетону» для балок серії ПБ-2, заміряні суб-мікронними індикаторами (ПБ-2_бет_Інд), заміряні методом ЦКЗ з використанням маркерів (ПБ-2_бет_ЦКЗ (тарг)), з використанням кореляційного спеклу (ПБ-2_бет_ЦКЗ (спекл))

Експериментально заміряні графіки розвитку прогинів (усереднені для зразків серії ПБ-2) наведено на рис. 3.10.

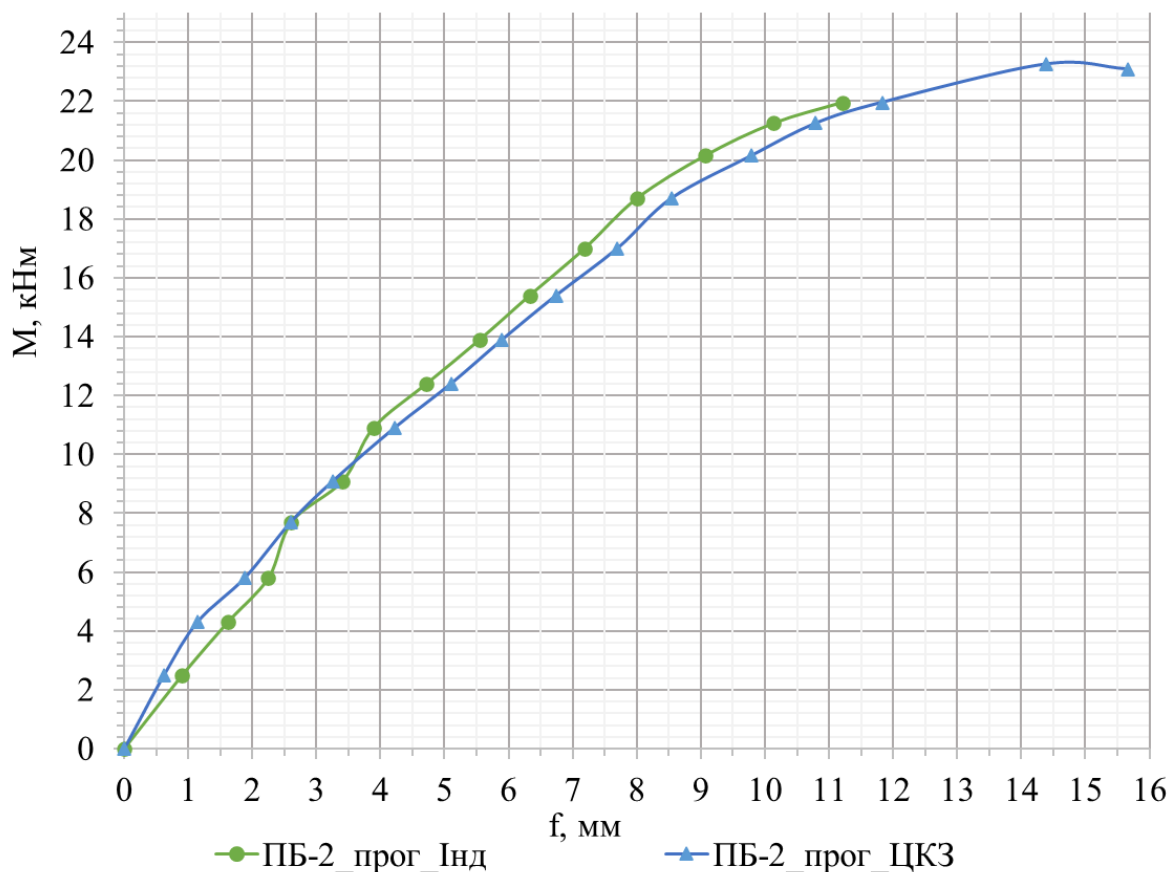


Рис.3.10. Усереднені експериментальні графіки «момент - прогин» для балок серії ПБ-2, заміряні методом ЦКЗ (ПБ-2_прог_ЦКЗ) і суб-мікронними індикаторами (ПБ-2_прог_Інд)

Як бачимо, використання індикаторів дозволило відслідкувати розвиток прогинів лише до початку кришення бетону стиснутої зони (оскільки центральний прогиномір був закріплений в центрі верхньої грані балки), при цьому заміряні ними значення ($f_u = 11.85$ мм, усереднені) є нижчими ніж результати ЦКЗ ($f_u = 12.91$ мм, усереднені) на 8%. Цифрова кореляція зображень дозволила прослідкувати розвиток деформацій на пізніших етапах руйнування до максимального прогину (що перевищив граничні нормативні значення) $f_{\max} = 15.50$ мм (усереднене). В порівнянні із контрольними зразками КБ-0 спостерігаємо незначне збільшення прогинів (2.7%, згідно із ЦКЗ), тоді як максимальний прогин $f_{\max}$ зріз на 23.31%.

Результати експериментальних досліджень для зразків серій ПБ-2-ПБ-5 порівнювали з даними попередньої роботи [8], в якій було проведене детальне експериментально-теоретичне дослідження балок з еквівалентними

пошкодженнями арматури і з аналогічними характеристиками дослідних зразків. Відповідні результати, використані для оцінки ефекту підсилення наведено в табл. 3.6.

Відповідно, значення прогинів для данної серії порівнювались із непідсиленими зразками з еквівалентним пошкодженнями арматури [8], при цьому порівнювались як прогини в момент вичерпання несучої здатності, так і максимально заміряні прогини на пізніших етапах руйнування (див. табл. 3.4). Застосування композитної стрічки дозволило зменшити прогини при M_d^{exp} на 15.2% і 9.4%, згідно з індикаторами і ЦКЗ, відповідно, а максимальний прогин, - на 3.12%.

Загалом, можна відмітити наступний ефект підсилення для балок серії ПБ-2: (1) в порівнянні з контрольними балками серії КБ-0, - відновлення несучої здатності до рівня 111.58 і 110.25% згідно з індикаторами і ЦКЗ, відповідно (якщо прийняти несучу здатність КБ-0 як базисне значення в 100%); (2) в порівнянні з непідсиленими зразками з еквівалентним пошкодженнями арматури [8] (табл. 3.6.), - збільшення моменту вичерпання несучої здатності на 30.36 і 30.15%.

В зразках ПБ-3-7 і ПБ-3-8 з 3-ї серії основну арматуру Ø20 A500C було сточено до Ø16 мм на довжині 120 мм, що відповідає середній стадії корозії. Для цієї серії експериментальних зразків текучість арматури почалась при моментах $M_r^{\text{exp}} = 19.36$ кНм, 18.82 кНм (згідно з індикаторами) і $M_r^{\text{exp}} = 19.7$ кНм, 18.94 кНм (згідно з ЦКЗ). Відповідні графіки деформації (усереднені для 2-х зразків серії) основної арматури і композитної стрічки в координатах «М- $\epsilon \times 10^3$ » наведено на рис. 3.11. При незначних відхиленнях між зразками (до 4 %) в подальшому аналіз експериментальних випробувань проводитимемо за усередненими даними. Зокрема, після початку текучості спостерігали різке зростання деформацій в арматурі, при цьому в композитній стрічці значних змін в деформаціях не відбувалося. Деформації в композитній стрічці підсилення на етапі руйнування досягли значення $\epsilon_f = 3.89 \times 10^{-3}$, що складає 78 % від граничних згідно з [101, 102], і 30%, -

згідно з показниками, регламентованими виробником [21] $\varepsilon_{fu}=17\times 10^{-3}$ (див. табл.3.5).

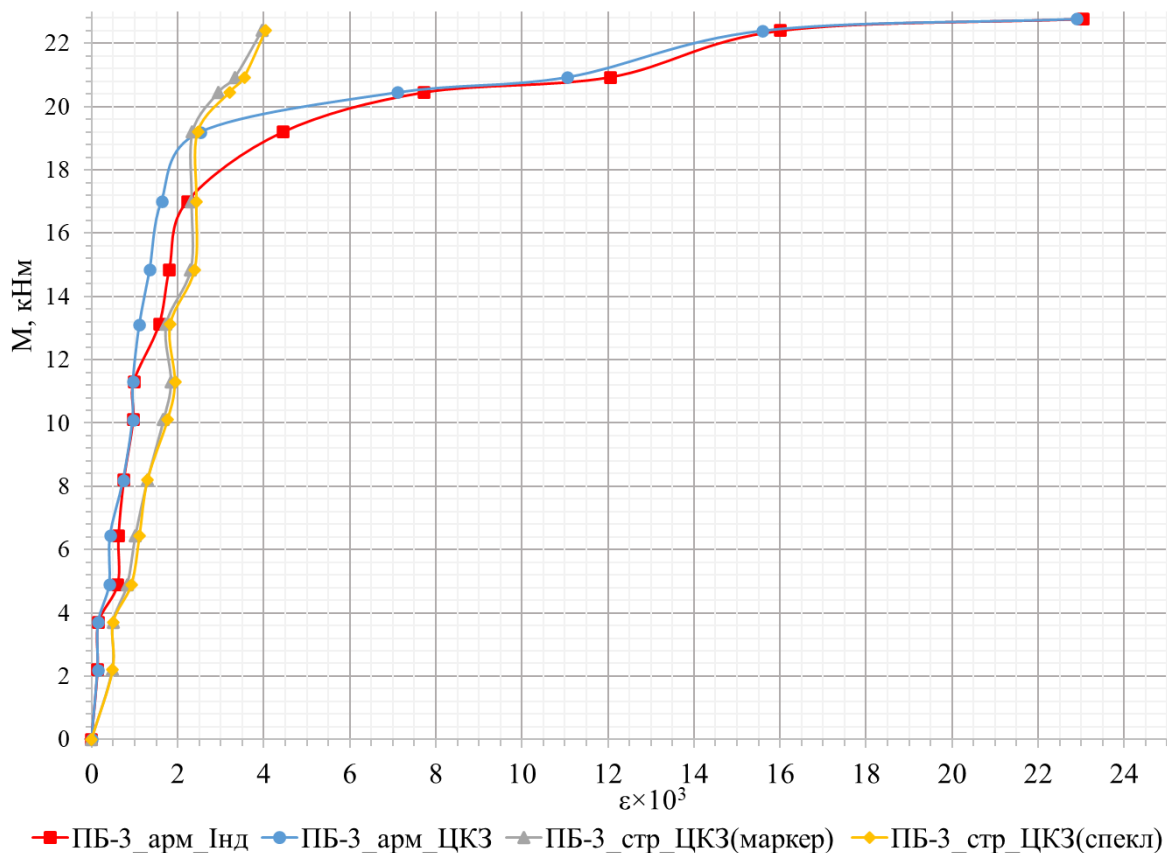


Рис.3.11. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації арматури» для балок серії ПБ-3, заміряні методом ЦКЗ для сталевих арматур (ПБ-3_арм_ЦКЗ), суб-мікронними індикаторами для сталевих арматур (ПБ-3_арм_Инд), заміряні методом ЦКЗ з використанням маркерів для стрічок (ПБ-3_стр_ЦКЗ (маркер)), з використанням кореляційного спеклу для стрічок (ПБ-3_стр_ЦКЗ (спекл))

Вичерпання несучої здатності зразків ПБ-3-7 і ПБ-3-8 відбулось внаслідок руйнування бетону стиснутої зони при згинальному моменті $M_d^{exp}=22.54$ кНм (див. рис.3.12). При цьому результати методу ЦКЗ з використанням маркерів і кореляційного спеклу були досить близькими, з похибкою, що не перевищила 2%.

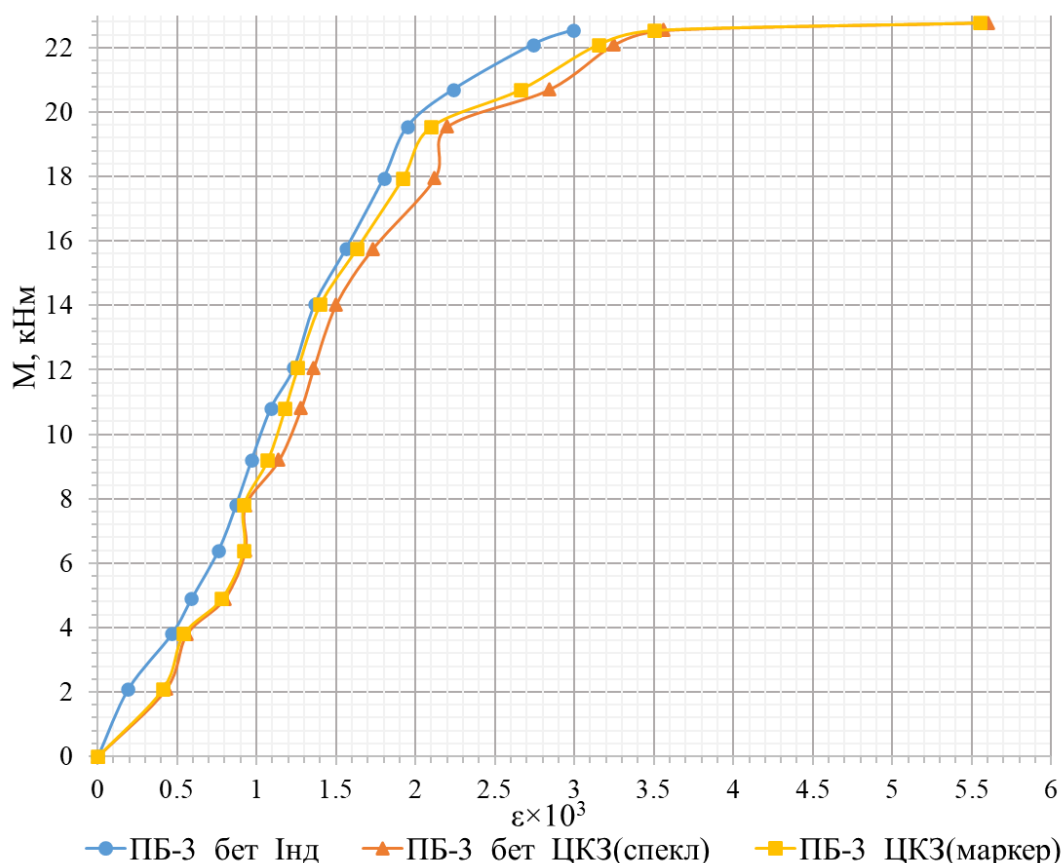


Рис.3.12. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації бетону» для балок серії ПБ-3, заміряні суб-мікронними індикаторами (ПБ-3_бет_Инд), заміряні методом ЦКЗ з використанням маркерів (ПБ-3_бет_ЦКЗ (маркер)), з використанням кореляційного спеклу (ПБ-3_бет_ЦКЗ (спекл))

Графіки прогинів (усереднені) в зоні чистого вигину (заміряні центральним прогиноміром) наведені на рис. 3.13. На етапі вичерпання несучої здатності прогини досягнули рівня $f_u = 12.04$ і 12.25 мм (усереднені значення згідно з індикаторами і ЦКЗ). Методика цифрової кореляції зображень дозволила відслідкувати подальший розвиток прогинів до значення $f_{max} = 15.48$ мм, що перевищує максимально заміряний прогин для балок КБ-0 на 23.15%. В порівнянні з пошкодженими балками без підсилення [8], завдяки застосуванню композитних стрічок прогини зменшились на 31-32 % на етапі вичерпання несучої здатності і на 13%,- максимальне значення прогинів (див. табл. 3.4).

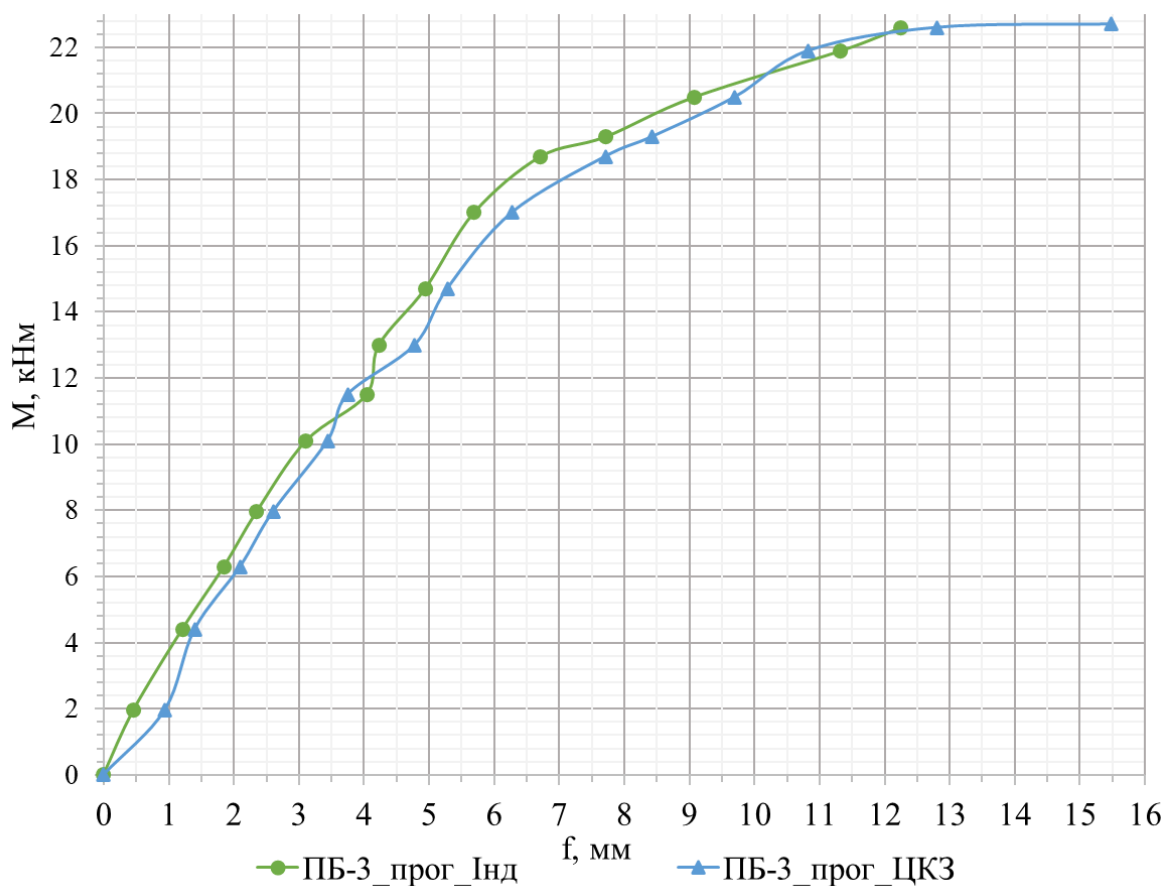


Рис.3.13. Усереднені експериментальні графіки «момент - прогин» для балок серії ПБ-3, заміряні методом ЦКЗ (ПБ-3_прог_ЦКЗ) і суб-мікронними індикаторами (ПБ-3_прог_Інд)

Зіставлення експериментальних результатів для 3-ї серії зразків із непідсиленими балками з еквівалентним пошкодженням арматури [8] (табл.3.6), показало, що підсилення дозволяє підвищити несучу здатність на 65.49 % і 65.56 % (згідно з індикаторами і ЦКЗ, відповідно). Також, як бачимо з порівняння із серією КБ-0, такий спосіб підсилення дозволяє повністю відновити несучу здатність до рівня контрольних зразків (до 106.52 % і 104.49 % за індикаторами і ЦКЗ, відповідно, якщо прийняти несучу здатність КБ-0 як 100%, див. табл. 3.3).

Наступний етап корозії було змодельовано в зразках 4-ї серії ПБ-4-9 і ПБ-4-10, де арматуру Ø20A500C було сточено до Ø14 мм на довжині 120 мм. Загальний характер графіків деформацій є аналогічним до попередніх серій. Момент M_r^{exp} , що відповідав текучості арматури для зразків серії був дещо нижчим (19.65 і 18.59 кНм згідно з індикаторами; 19.09 і 17.97 кНм згідно з ЦКЗ), що зокрема можна пояснити

сточуванням термічно-зміцненого шару в арматурі (див. рис.3.14). Після досягнення текучості в основній робочій арматурі подальші зусилля розтягу сприймалися композитною стрічкою. Максимальні деформації стрічок для зразків в серії досягали рівня $\varepsilon_f = 3.96 \times 10^{-3}$ (усереднене для 2-х зразків), що відповідає 79% її використання згідно з [101, 102] і 30.5% використання, - згідно з характеристиками, регламентованими виробником [21] (див. табл. 3.5). Детальніше результати для цих зразків описано в роботі [139].

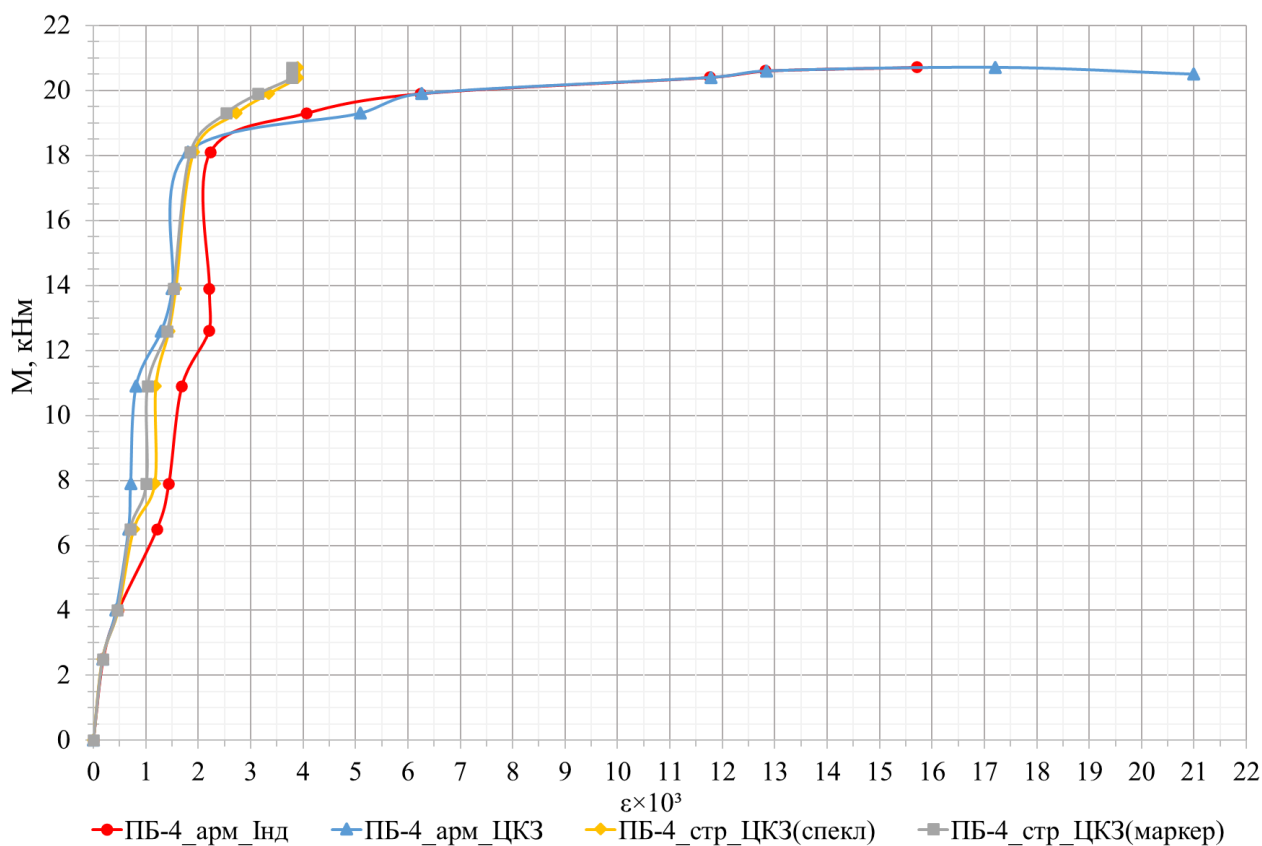


Рис.3.14. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації арматури» для балок серії ПБ-4, заміряні методом ЦКЗ для сталевих арматур (ПБ-4_арм_ЦКЗ), суб-мікронними індикаторами для сталевих арматур (ПБ-4_арм_Інд), заміряні методом ЦКЗ з використанням кореляційного спеклу для стрічок (ПБ-4_стр_ЦКЗ (спекл)), з використанням маркерів для стрічок (ПБ-4_стр_ЦКЗ (маркер))

Моменти вичерпання несучої здатності M_r^{exp} внаслідок досягнення бетоном граничних деформацій в найбільш стиснутій фібрі і його кришення

відповідали значенням 20.08 і 19.65 кНм, згідно з індикаторами і ЦКЗ, відповідно (усереднені для 2-х зразків, див. рис.3.15). Значення деформацій за 2-ма методами є досить близькими на всіх ступенях навантаження. Крім того «нульова перевірка» на штучних маркерах підтвердила відсутність додаткових зовнішніх факторів, що могли вплинути на точність вимірювань.

Загалом, для зразків серії ПБ-4 ступінь відновлення несучої здатності (порівняно з КБ-0 як 100%) склав на 95.89 і 91.10% згідно з індикаторами і ЦКЗ, відповідно. При порівнянні з пошкодженими і непідсиленими зразками [8] (табл.3.6), визначено ефект підсилення $\Delta=84.89$ і 90.04 %.

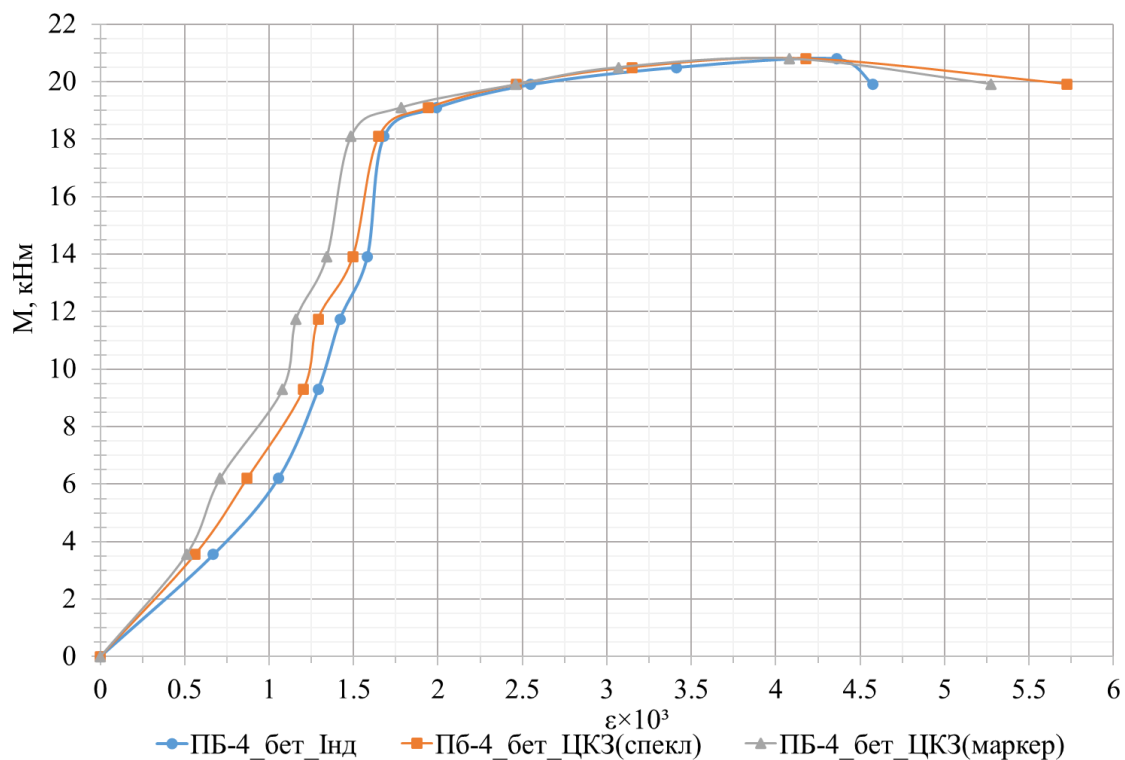


Рис.3.15. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації бетону» для балок серії ПБ-4, заміряні суб-мікронними індикаторами (ПБ-4_бет_Інд), заміряні методом ЦКЗ з кореляційного спеклу (ПБ-4_бет_ЦКЗ(спекл)), з використанням маркерів (ПБ-4_бет_ЦКЗ(маркер))

Розвиток прогинів в центральній зоні зразків серії ПБ-4 відображено усередненими графіками на рис.3.16. Для даної серії зміни прогинів протягом навантаження, заміряні 2-ма методиками є досить близькими з відхиленнями близько 1-2%: на рівні вичерпання несучої здатності усереднені $f_u=11.98, 12.07$ мм,

згідно з індикаторами і ЦКЗ, відповідно; для максимально замірених прогинів, - усереднені $f_{\max} = 14.14, 14.25$ мм. Як бачимо, для балок із арматурою, сточеною до Ø14 мм прогин на етапі вичерпання несучої здатності сягає граничного нормативного значення. При цьому, застосування стрічки до пошкоджених зразків дозволило зменшити прогин на етапі вичерпання несучої здатності на 25.13% і 24.58 %, згідно з індикаторами і ЦКЗ (порівняно з [8]), а максимальний прогин, - на 18.5% (див. табл. 3.4). Порівняно з балками контрольної серії спостеріємо зменшення прогинів при M_d^{exp} на 1.3% і 3.98 % згідно з індикаторами і ЦКЗ, а максимальний прогин, - на 13.37% (див. табл. 3.4).

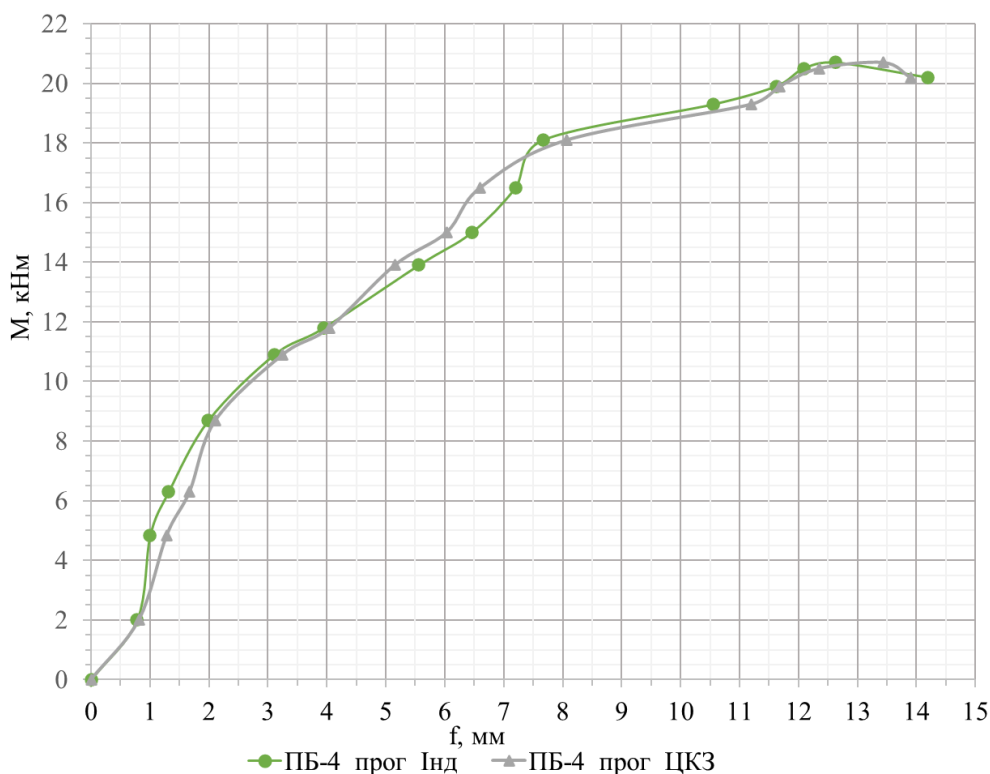


Рис.3.16. Усереднені експериментальні графіки «момент - прогин» для балок серії ПБ-4, замірени методом ЦКЗ (ПБ4_прог_ЦКЗ) і суб-мікронними індикаторами (ПБ-4_прог_Інд)

Серія ПБ-5 відповідала корозійним пошкодженням що спричинили втрату поперечного перерізу армування на 64 % (сточування Ø20A500С до Ø12 мм). Значний ступінь сточування робочої арматури призвів до значного зниження як моменту текучості арматури ($M_r^{\text{exp}} = 11.15$ кНм), так і моменту вичерпання несучої

здатності через кришення бетону ($M_d^{\text{exp}}=16.87$ і 15.83 кНм, згідно з індикаторами і ЦКЗ, відповідно), як бачимо з рис. 3.17-3.18. Після досягнення деформаціями в сталевій арматурі значень, що відповідають текучості ($\varepsilon_{yk}=2.84 \cdot 10^{-3}$) спостерігали різке зростання деформацій і в арматурі, і в стиснутому бетоні. При цьому зусилля розтягу на цьому етапі сприймалися вже композитною стрічкою, яка досягнула на етапі руйнування максимальних деформацій $\varepsilon_f=4.22 \times 10^{-3}$ (усереднене для 2-х зразків), що відповідає 84% її використання згідно з [101, 102] і 32.5% використання, - згідно з характеристиками, регламентованими виробником [21] (див. табл. 3.5).

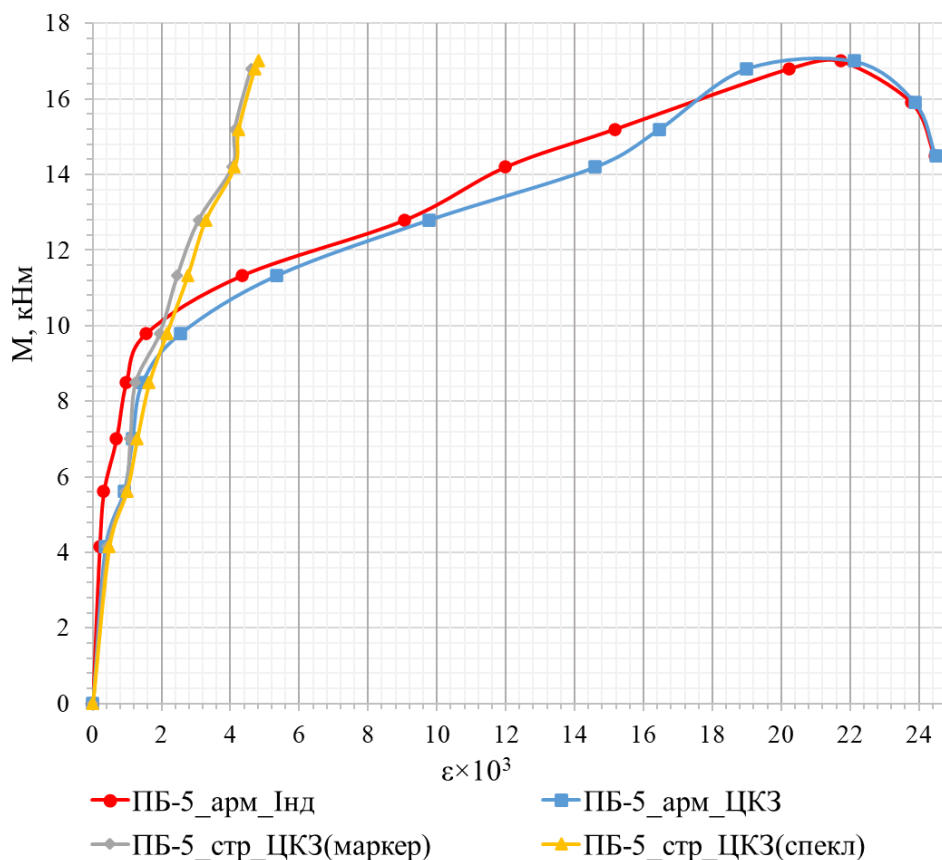


Рис.3.17. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації арматури» для балок серії ПБ-5, заміряні методом ЦКЗ для сталеві арматури (ПБ-5_арм_ЦКЗ), суб-мікронними індикаторами для сталеві арматури (ПБ-5_арм_Інд), заміряні методом ЦКЗ з використанням кореляційного спеклу для стрічок (ПБ-5_стр_ЦКЗ (спекл)), з використанням маркерів для стрічок (ПБ-5_стр_ЦКЗ (маркер))

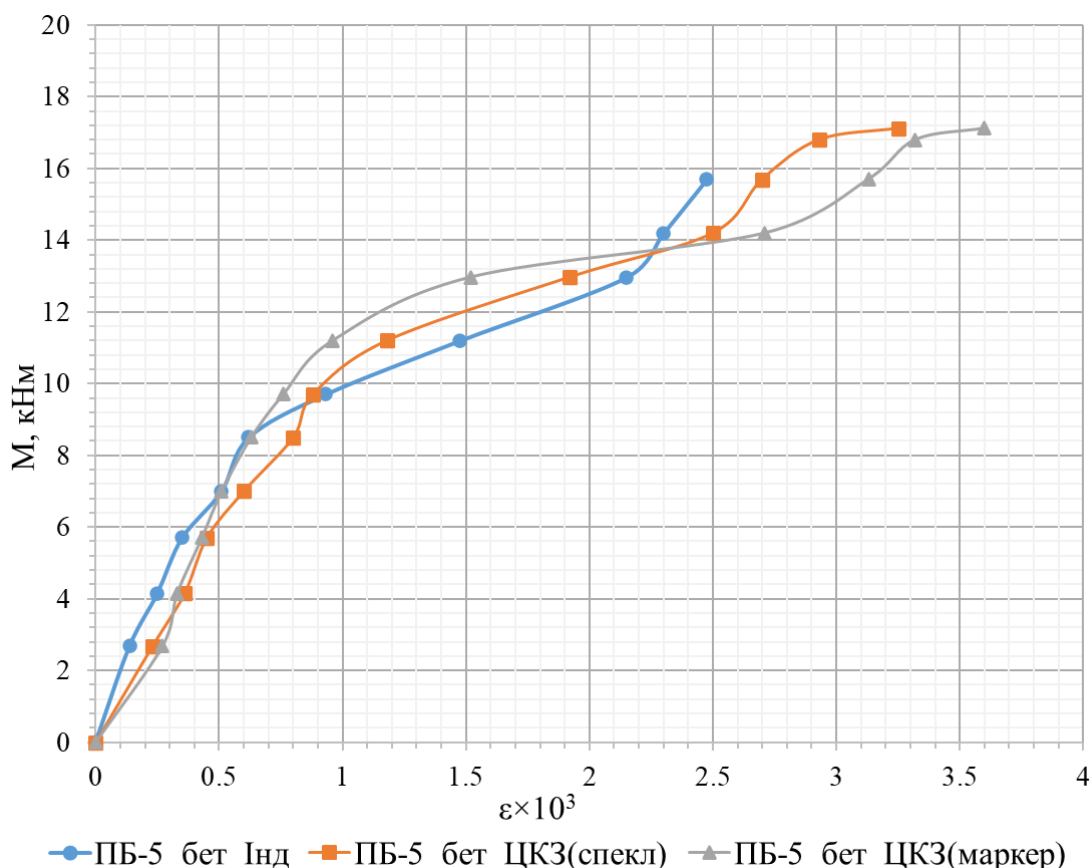


Рис.3.18. Усереднені експериментальні графіки «момент - відносні деформації бетону» для балок серії ПБ-5, заміряні суб-мікронними індикаторами (ПБ-5_бет_Інд), заміряні методом ЦКЗ з кореляційного спеклу (ПБ-5_бет_ЦКЗ (спекл)), з використанням маркерів (ПБ-5_бет_ЦКЗ (маркер))

Як видно з графіку на рис. 3.19, після досягнення текучості в сталевій арматурі також спостерігалось різке зростання прогинів в центральних перерізах балок серії ПБ-5. На етапі вичерпання несучої здатності (кришення бетону стиснутої зони), прогини (усереднені для 2-х зразків) становили $f_u = 11.91, 12.18$ мм, згідно з індикаторами і ЦКЗ, відповідно, що не перевищує граничних значень, регламентованих нормативними документами. Максимальних значень прогини досягали після руйнування бетону стиснутої зони і становили $f_{max} = 15.49, 16.02$ мм, згідно з індикаторами і ЦКЗ, відповідно (усереднені). Результати свідчать, що застосування композитного підсилення дозволило зменшити прогини f_u на етапі вичерпання несучої здатності на 18.56% і 14.23 % згідно з індикаторами і ЦКЗ (порівняно з [8]), а максимальний прогин зменшився на 11%. В порівнянні з

балками серії КБ-0 зразки даної серії акож показали дещо нижчу деформативність: прогини зменшились на 2-3% на етапі вичерпання несучої здатності і на 27.45%, - для максимальних значень (див. табл. 3.4).

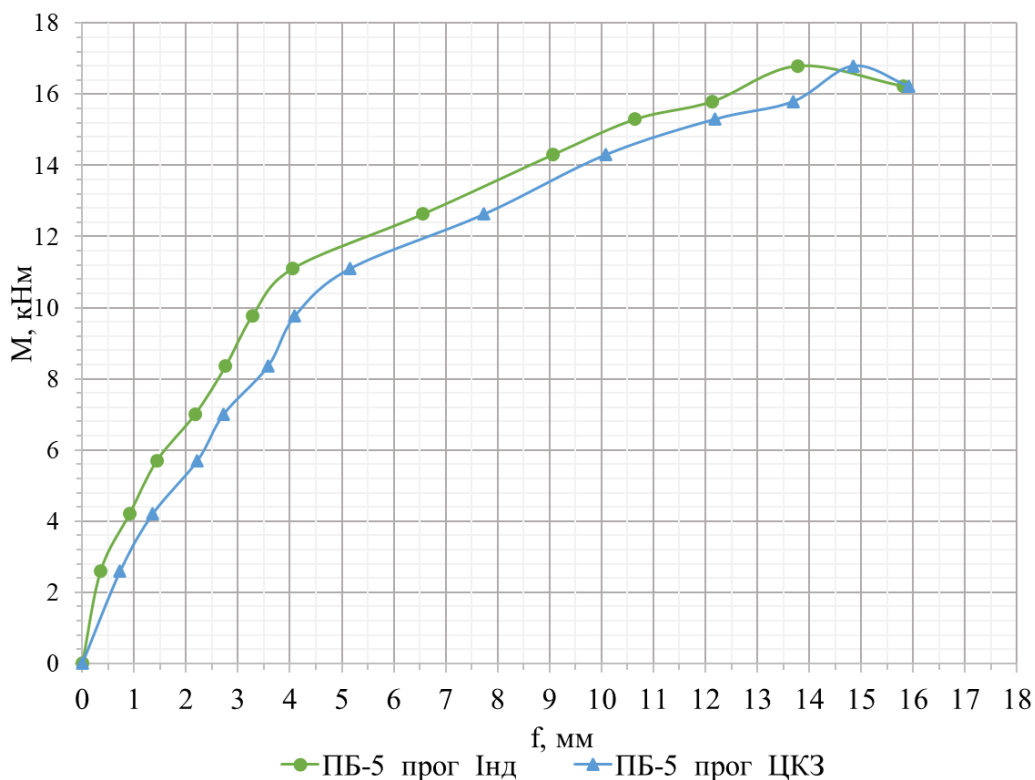


Рис.3.19. Усереднені експериментальні графіки «момент - прогин» для балок серії ПБ-5, заміряні методом ЦКЗ (ПБ5_прог_ЦКЗ) і суб-мікронними індикаторами (ПБ-5_прог_Інд)

Загалом, застосування підсилення композитною стрічкою дозволило відновити несучу здатність зразків серії ПБ-5 до рівня 73-79 % від початкової (порівняно з КБ-0, прийняті як 100%), а в порівнянні з непідсиленими зразками з еквівалентними пошкодженнями [8], - на $\Delta M = 93.55$ і 109.89 %, згідно з ЦКЗ і індикаторами, відповідно.

Важливо підкреслити, що за результатами цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) та візуального моніторингу для всіх експериментальних зразків не було зафіксовано жодних ознак відшарування або проковзування композитної стрічки. Це свідчить про високу ефективність запропонованої системи анкерування, яка забезпечує надійну передачу зусиль від бетону до композиту без втрати зчеплення навіть при досягненні граничних деформацій бетонного елемента.

Метод ЦКЗ дав змогу відстежити поведінку композитного підсилення на всіх етапах навантаження, включно з фазою руйнування. Встановлено сумісну роботу композитної стрічки із залізобетонною балкою та її здатність ефективно сприймати зусилля розтягу аж до повного вичерпання несучої здатності конструкції. Отримані дані підтвердили стабільну деформаційну відповідь системи підсилення. У найбільш пошкодженій серії зразків (ПБ-5) зафіксовано, що деформації стрічки досягали 84% від граничних значень, рекомендованих FIB Model Code 2010, без втрати ефективності або ознак відшарування.

Таким чином, результати випробувань не лише підтверджують ефективність застосованого композитного підсилення в умовах різного ступеня корозійного пошкодження арматури, але й демонструють його надійність, сумісність із бетоном і відсутність негативних проявів (проковзування, втрати адгезії). Це дозволяє рекомендувати запропоновану схему підсилення для практичного застосування під час відновлення залізобетонних елементів із порушеною несучою здатністю. Зведені результати випробувань експериментальних зразків балок всіх серій наведено в табл. 3.3-3.5., графічне представлення, -на рис. 3.20-3.23.

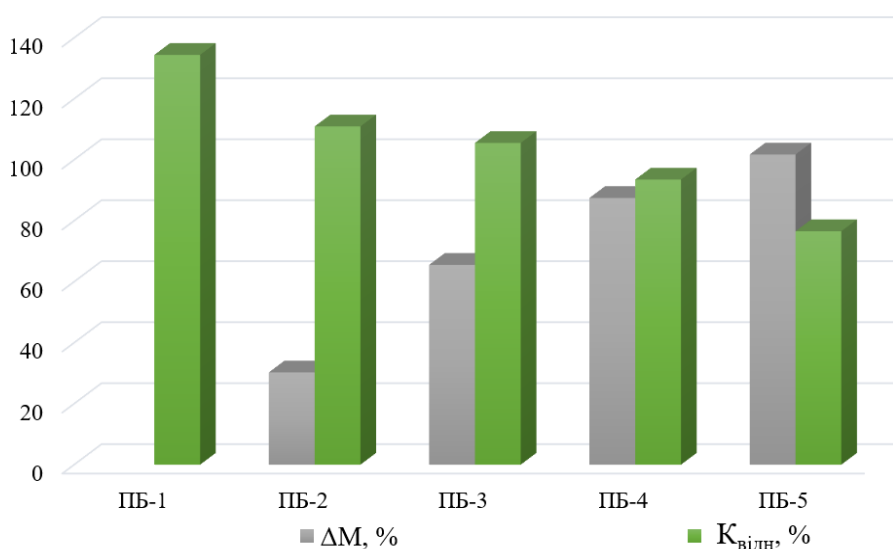


Рис.3.20. Порівняльний аналіз ефекту підсилення: ΔM -ефект підсилення в порівнянні з непідсиленими пошкодженими зразками (%); $K_{\text{відн}}$ - ступінь відновлення несучої здатності в порівнянні з контрольними зразками (%)

Таблиця 3.3

Несуча здатність експериментальних зразків залізобетонних балок

Шифр зразка	Ø _{арм} , мм	Згідно з суб-мікронними індикаторами				Згідно з ЦКЗ				Ефект підсилення в порівнянні з непідсиленими пошкодженими зразками [8], Δ% (індикатори/ЦКЗ)*	Ступінь відновлення несучої здатності в порівнянні з контрольними зразками, % (індикатори/ЦКЗ)*
		Текучість основної арматури M_r^{exp} , кНм		Вичерпання несучої здатності M_d^{exp} , кНм		Текучість основної арматури M_r^{exp} , кНм		Вичерпання несучої здатності M_d^{exp} , кНм			
		зразка	середнє	зразка	середнє	зразка	середнє	зразка	середнє		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
КБ-0-1	20	19.79	19.87	21.02	21.16	–	–	21.92	21.57	–	–
КБ-0-2		19.95		21.31		–		21.15			
ПБ-1-3	20	27.94	28.45	28.08	28.51	28.04	28.51	28.54	28.91	–	134.74/134.03
ПБ-1-4		28.96		28.94		28.98		29.28			
ПБ-2-5	20→18	22.46	21.88	24.13	23.61	22.01	21.53	24.21	23.78	30.36/30.15	111.58/110.25
ПБ-2-6		21.30		23.09		21.05		23.35			
ПБ-3-7	20→16	19.36	19.09	22.92	22.54	19.7	19.32	22.95	22.55	65.49/65.56	106.52/104.49
ПБ-3-8		18.82		22.16		18.94		22.13			
ПБ-4-9	20→14	19.65	19.12	20.36	20.08	19.09	18.53	20.11	19.65	84.89/90.04	95.89/91.10
ПБ-4-10		18.59		19.80		17.97		19.19			
ПБ-5-11	20→12	10.71	11.15	16.55	16.87	11.22	11.55	15.6	15.83	109.89/93.55	79.72/73.39
ПБ-5-12		11.59		17.19		11.87		16.06			

*Примітка 1 (також для табл.3.4): індикатори- порівняння моментами вичерпання несучої здатності згідно з індикаторами, ЦКЗ-те саме, згідно з ЦКЗ. Відсоткові значення показують ступінь відновлення початкової в порівнянні з непошкодженими контрольними зразками (де 100%-несуча здатність зразків серії КБ-0), або приріст (Δ, %) в порівнянні з пошкодженими непідсиленими зразками.

Таблиця 3.4

Деформативність експериментальних зразків залізобетонних балок

Шифр зразка	Згідно з суб-мікронними індикаторами				Згідно з ЦКЗ				Зміна в прогинах в порівнянні з непідсиленими пошкодженими зразками [8], % (індикатори/ЦКЗ/ЦКЗ-макс)*	Зміна в прогинах в порівнянні з контрольними зразками, % (індикатори/ЦКЗ/ЦКЗ-макс)*
	Прогин в момент вичерпання несучої здатності f_u , мм		Максимальний прогин f_{max} , мм		Прогин в момент вичерпання несучої здатності f_u , мм		Максимальний прогин f_{max} , мм			
	зразка	середнє	зразка	середнє	зразка	середнє	зразка	середнє		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
КБ-0-1	12.14	12.14	12.14	12.14	12.34	12.57	12.34	12.57	–	–
КБ-0-2	12.26		12.26		12.79		12.79			
ПБ-1-3	12.43	12.89	15.6	16.01	12.09	12.4	15.89	16.4	–	+6.17 /-1.35/+30.46
ПБ-1-4	13.35		16.42		12.71		16.91			
ПБ-2-5	12.36	11.85	12.36	11.85**	13.23	12.91	15.93	15.50	-15.2/-9.4/-7.12	-2.38 /+2.7/+23.31
ПБ-2-6	11.34		11.34		12.59		15.07			
ПБ-3-7	12.43	12.04	12.48	12.04**	12.66	12.25	15.99	15.48	-32.3 /-31.3/-13.03	-0.8 /-2.54/+23.15
ПБ-3-8	11.65		11.6		11.84		14.97			
ПБ-4-9	12.3	11.98	14.67	14.14	12.45	12.07	14.71	14.25	-25.13/-24.58/-18.5	-1.3/-3.98/+13.37
ПБ-4-10	11.66		13.61		11.69		13.79			
ПБ-5-11	11.48	11.91	14.97	15.49	11.87	12.18	15.53	16.02	-18.56/-14.23/-11.0	-1.8 /-3.1/+27.45
ПБ-5-12	12.34		16.01		12.49		16.51			

*Примітка: індикатори- порівняння з прогинами в момент вичерпання несучої здатності згідно з індикаторами, ЦКЗ-те саме, згідно з ЦКЗ, ЦКЗ-макс- порівняння з максимальними прогинами, згідно з ЦКЗ; знак «-» означає зменшення прогинів, «+», -збільшення.

**Примітка 2 (також для табл. 3.4 і 4.2): для зразків серій ПБ-2 і ПБ-3 максимальний прогин індикаторами не було заміряно, через порушення контакту між прогиноміром і поверхнею бетону (кришення бетону стиснутої зони).

Таблиця 3.4 (продовження)

Деформативність експериментальних зразків залізобетонних балок

Шифр зразка	Ø _{арм} , мм	Момент, що відповідає граничному прогину, кНм				Ефект в порівнянні з невідсилюваними пошкодженими зразками [8], Δ% (індикатори/ЦКЗ)*	Ефект в порівнянні з контрольними зразками, % (індикатори/ЦКЗ)*
		Згідно з суб-мікронними індикаторами		Згідно з ЦКЗ			
		зразка	середнє	зразка	середнє		
1	2	3	4	5	6	7	8
КБ-0-1	20	21.02	21.16*	21.92	21.57***	–	–
КБ-0-2		21.31		21.15			
ПБ-1-3	20	27.88	28.09	27.82	28.17	–	132.75/130.59
ПБ-1-4		28.3		28.52			
ПБ-2-5	20→18	24.13	23.61**	23.63	23.26	36.95/45.1	111.58/107.83
ПБ-2-6		23.09		22.89			
ПБ-3-7	20→16	22.92	22.54**	22.88	22.54	110.65/129.3	106.52/104.49
ПБ-3-8		22.16		22.2			
ПБ-4-9	20→14	20.36	20.08	20.11	19.65	96.67/98.69	94.89/91.10
ПБ-4-10		19.80		19.19			
ПБ-5-11	20→12	16.3	16.61	15.45	15.74	123.25/107.65	78.49/72.97
ПБ-5-12		16.92		16.03			

*Примітка 1: див. табл 3.3.

**Примітка 2: див. табл.3.4 (початок)

***Примітка 3: В зразках серії КБ-0 граничний прогин не було досягнуто.

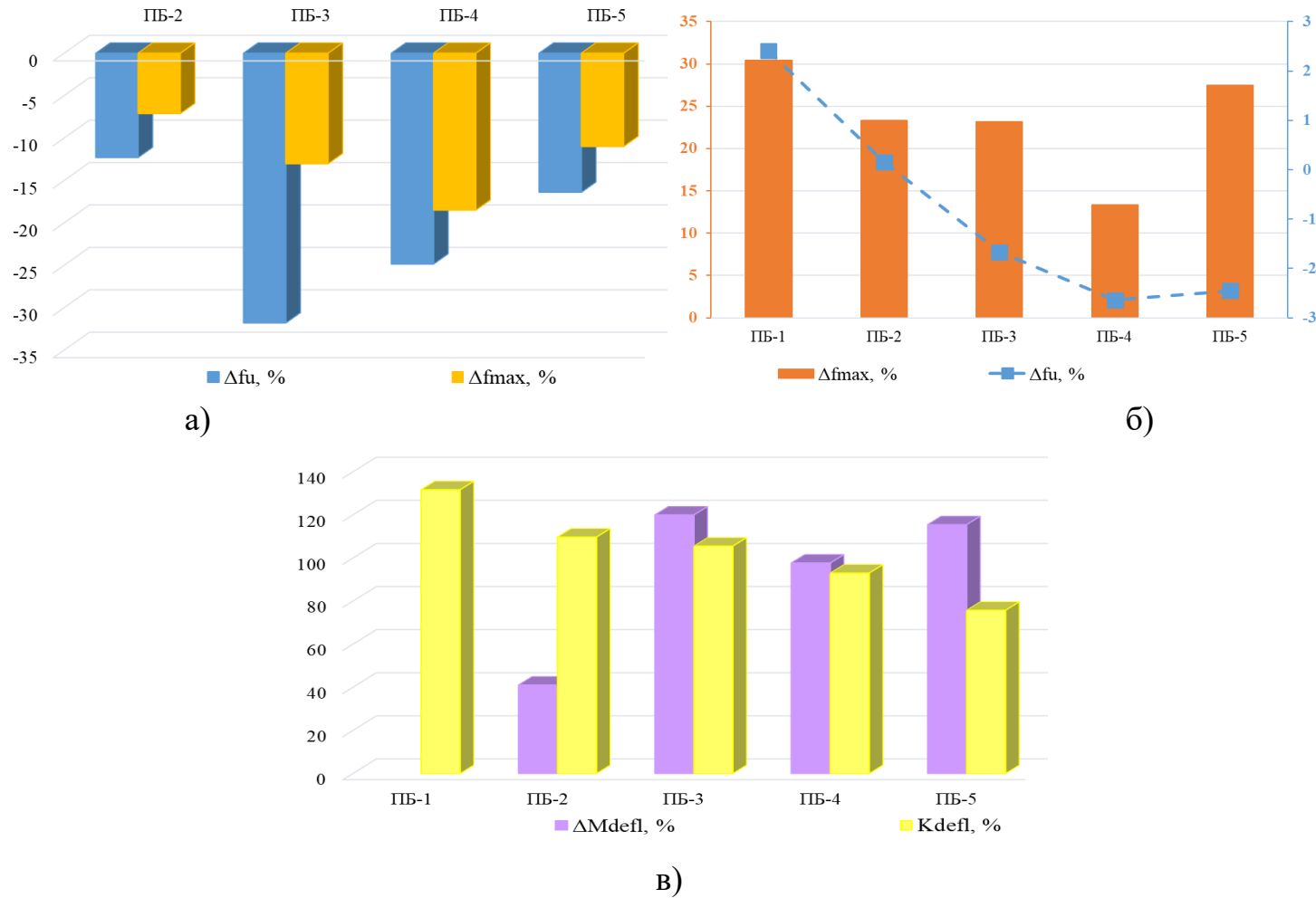


Рис.3.21. Порівняльний аналіз впливу підсилення на деформативність: а) зміна в прогибах в момент вичерпання несучої здатності ($\Delta f_u, \%$) і в максимальних прогибах ($\Delta f_{max}, \%$) в порівнянні з непідсиленими пошкодженими зразками; б) те саме в порівнянні з контрольними зразками; в) зміна в моменті досягнення граничного прогину в порівнянні з непідсиленими пошкодженими зразками ($\Delta M_{defl}, \%$) і ефект підсилення в порівнянні з контрольними зразками ($K_{defl}, \%$)

Таблиця 3.5

Відсоток використання композитної стрічки (згідно з граничними деформаціями)

Шифр зразка	Ø _{арм} , мм	Максимальна деформація в стрічці, $\varepsilon_f \times 10^3$		Відсоток використання згідно з	
		зразка	середнє	FIB Bulletins [101, 102], %	Виробник Sika [21], %
1	2	3	4	5	6
ПБ-1-3	20	3.58	3.79	76	29
ПБ-1-4		4.0			
ПБ-2-5	20→18	3.70	3.81	76	29
ПБ-2-6		3.92			
ПБ-3-7	20→16	4.04	3.89	78	30
ПБ-3-8		3.74			
ПБ-4-9	20→14	4.01	3.96	79	30.5
ПБ-4-10		3.91			
ПБ-5-11	20→12	4.05	4.22	84	32.5
ПБ-5-12		4.39			

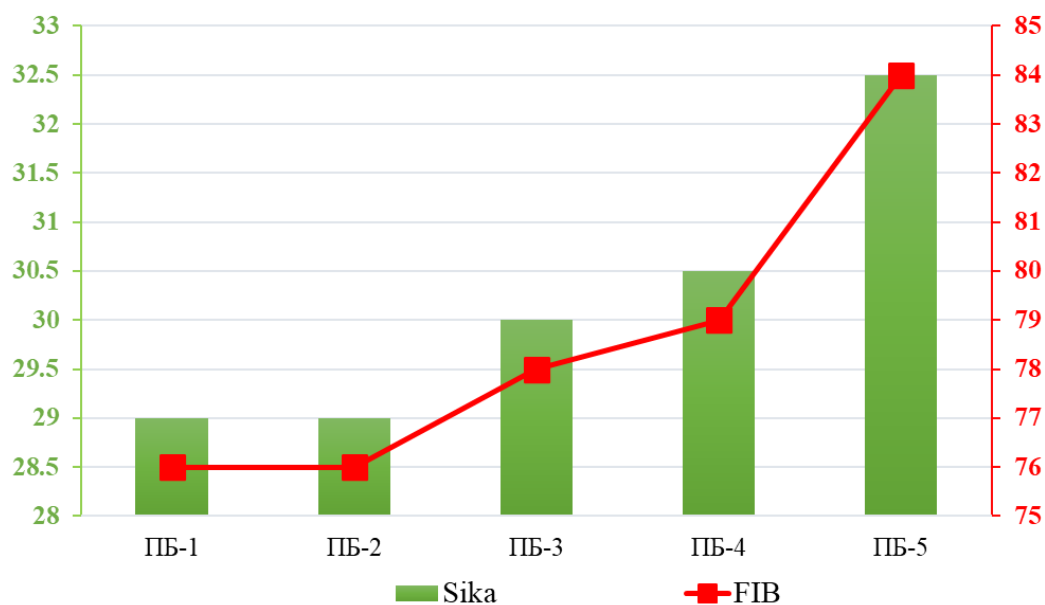


Рис.3.22. Відсоток використання композитної стрічки (згідно з граничними деформаціями, %): Sika- згідно з виробником Sika [21]; FIB-згідно з FIB Bulletins [101, 102]

Таблиця 3.6

Результати попередніх досліджень залізобетонних балок з еквівалентними пошкодженнями для аналізу ефекту підсилення [8]

Ступінь пошкодження	Момент при вичерпанні несучої здатності, кНм	Максимальний прогин, мм	Момент досягнення граничного прогину, мм (індикатори/ЦКЗ)
1	2	3	4
20→18	18.19	16.6	17.24/16.03
20→16	13.62	17.5	10.7/9.83
20→14	10.60	16.9	10.21/9.89
20→12	7.9	17.8	7.44/7.58

Загалом, можна підсумувати, що випробування залізобетонних балок всіх серій показали схожу тенденцію поведінки під навантаженням: після досягнення межі текучості арматури у всіх серіях зразків відбувалося інтенсивне зростання деформацій у найбільш стиснутих волокнах бетону, що зрештою призводило до руйнування бетону стиснутої зони. У зразках, підсиленних карбоновою композитною стрічкою (серії ПБ-1–ПБ-5), зусилля розтягу після початку текучості ефективно сприймалися карбоновою стрічкою, що підтверджує повноцінне включення композитного матеріалу в роботу конструкції. Усі зразки зазнали кінцевого руйнування саме через кришення бетону стиснутої зони (досягнення граничних деформацій в бетоні стиснутої зони), при цьому не було зафіксовано жодних ознак відшарування композитної стрічки, що свідчить про ефективність запропонованого методу анкерування та забезпечення сумісної роботи підсилювального матеріалу з бетоном протягом усього процесу навантаження. Крім того, оскільки підсилення виконувалося в зоні розтягу, підвищення несучої здатності пов'язане зі збільшенням площі стиснутої зони балок внаслідок зміщення нейтральної осі та перерозподілу напружень. Порівняно з контрольними зразками, вплив підсилення на величину прогинів у момент досягнення граничної несучої здатності був незначним, однак спостерігалось зростання максимальних прогинів після фактичного руйнування стиснутої зони бетону, заміряне методом ЦКЗ.

Для зразків серії КБ-0 (контрольні, непошкоджені, непідсилені) середнє значення моменту, що відповідав текучості основної арматури M_r^{exp} становило 19.87 кНм, а момент вичерпання несучої здатності M_d^{exp} становив 21.16 кНм і 21.57 кНм, згідно з показами мікроіндикаторів і ЦКЗ, відповідно. На цьому етапі прогин складав 12.14 мм і 12.57 мм (згідно з показами мікроіндикаторів і ЦКЗ, відповідно), що є меншим за граничне значення.

Для зразків серії ПБ-1 (непошкоджені, підсилені) усереднене значення моменту, що відповідав текучості основної арматури M_r^{exp} становило 28.45 кНм (згідно з індикаторами) і 28.51 кНм (згідно з ЦКЗ). Вичерпання несучої здатності M_d^{exp} було зафіксоване при навантаженні, що становило 28.51 кНм і 28.91 кНм, згідно з показами мікроіндикаторів і ЦКЗ, відповідно. При цьому, на даному етапі прогин складав 12.89 мм і 12.4 мм (згідно з 2 методами вимірювання: мікроіндикаторами і ЦКЗ). При цьому стрічку було використано на 76 % згідно з FIB Bulletins [101, 102], або 29 %, згідно з вказівками Sika [21].

Для підсилених зразків серії ПБ-2 (сточування діаметра до 18 мм, що відповідає 20 % втрати площі поперечного перерізу арматури) в середньому текучість арматури було досягнуто при згинальному моменті 21.88 кНм (згідно з індикаторами) і 21.53 кНм (згідно з ЦКЗ). Момент вичерпання несучої здатності для зразків цієї серії M_d^{exp} становив 23.61 кНм і 23.78 кНм (усереднені значення), згідно з показами мікроіндикаторів і ЦКЗ, відповідно. Крім того, було зафіксовано прогин в момент вичерпання несучої здатності, що становив 11.85 мм і 12.91 мм, згідно з мікроіндикаторами і ЦКЗ, відповідно. Відсоток використання стрічки для зразків цієї серії був аналогічним до ПБ-1.

Для підсилених балок із сточування арматури до 16 мм (серія ПБ-3, 36% втрати площі робочої арматури) було встановлено, що текучість арматури в середньому досягається при $M_r^{\text{exp}} = 19.09$ кНм і 19.32 кНм (за показами індикаторів і ЦКЗ, відповідно). При подальшому навантаженні, зусилля розтягу, як і в попередніх серіях сприймалися карбоновою стрічкою аж до моменту вичерпання

несучої здатності внаслідок кришення бетону, що становив 22.54 кНм і 22.55 кНм (за показами індикаторів і ЦКЗ, відповідно). В момент вичерпання несучої здатності прогин для зразків цієї серії складав 12.04 мм (згідно з індикаторами) і 12.25 мм (згідно з ЦКЗ). При цьому, стрічку було використано на 78 % (згідно з FIB Bulletins [101, 102]) або 30 % (згідно з вказівками Sika [21]).

Для підсилених зразків серії ПБ-4 (із залишковим діаметром 14 мм, 51% зменшення площі робочої арматури) середнє значення моменту, що відповідав текучості основної арматури M_r^{exp} становило 19.12 кНм і 18.53 кНм, а момент вичерпання несучої здатності M_d^{exp} становив 20.08 кНм і 19.65 кНм (за показами індикаторів і ЦКЗ, відповідно). На данному етапі усереднений прогин для зразків становив 11.98 мм або 12.07 мм (за показами індикаторів і ЦКЗ, відповідно), що не перевищує граничних значень. При цьому відсоток використання стрічки мало різнився від попередньої серії і становив 79 % (згідно з регламентованими FIB Bulletins даними) і 30.5 % (згідно з даними Sika).

Для підсилених зразків із найбільшим ступенем пошкодження робочої арматури (ПБ-5, 12 мм залишкового діаметру арматури і 64 % зменшення площі) моменти що відповідали початку текучості арматури і вичерпанню несучої здатності були найнижчими: $M_r^{\text{exp}} = 11.15$ кНм і 11.55 кНм, $M_d^{\text{exp}} = 16.87$ кНм і 15.83 кНм (за показами індикаторів і ЦКЗ, відповідно). Прогин в момент вичерпання несучої здатності для цих зразків також не перевищив граничні значення і становив 11.91 мм і 12.81 мм (за показами індикаторів і ЦКЗ, відповідно). Відсоток використання стрічки за граничними деформаціями був найвищий в порівнянні зі зразками всіх серій (84 %, -згідно з FIB Bulletins [101, 102] і 32.5 %, - згідно з Sika [21]). Важливо зазначити, що найбільший ефект від підсилення (вдвічі, в порівнянні із непідсиленими пошкодженими зразками [8]) спостерігався для найбільшого ступеня пошкодження робочої арматури, що свідчить про доцільність і ефективність використання композитних матеріалів при суттєвому зниженні несучої здатності внаслідок корозійного пошкодження.

3.3. Висновки до розділу 3.

Проведення експериментальних досліджень згідно з розробленою методикою дозволило оцінити вплив підсилення на несучу здатність і деформативність залізобетонних балок з пошкодженнями термічнозміцненої арматури і дослідити ефективність використання композитного матеріалу:

1. З використанням методики цифрової кореляції зображень за вдосконаленою методикою (з оптимальними параметрами спекла) і субмікронних індикаторів експериментальним шляхом визначено фізико-механічні характеристики бетону залізобетонних балок (за випробованими кубиками і призмами).
2. Відповідно до розробленої методики проведені експериментальні випробування залізобетонних балок для аналізу ефективності використання композитних матеріалів при відновленні несучої здатності, при чому програма експериментальних досліджень передбачала використання суб-мікронних індикаторів і методу цифрової кореляції зображень, що дозволило в автоматизованому дистанційному режимі фіксувати деформації бетону, арматури і прогинів включно до етапу вичерпання несучої здатності і фізичного руйнування дослідних зразків. Метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) дозволив детально відстежити розвиток деформацій аж до моменту повного руйнування зразків, фіксуючи широкий діапазон деформацій як у бетоні, так і в арматурі і композитній стрічці.
3. Випробуванням залізобетонних балок встановлено, що після досягнення межі текучості арматури в зразках усіх серій спостерігалось інтенсивне зростання деформацій у найбільш стиснутих волокнах бетону, що зрештою призводило до руйнування стисненої зони. Для зразків, підсилених композитною карбоновою стрічкою (серії ПБ-1–ПБ-5), після початку текучості розтягувальні зусилля ефективно сприймалися стрічкою, що підтверджує її ефективне включення в роботу конструкції. В усіх зразках вичерпання несучої здатності відбулось внаслідок руйнування бетону стиснутої зони, при цьому не було зафіксовано ознак відшарування композитної стрічки, що свідчить про ефективність запропонованого

способу анкерування та забезпечення сумісної роботи елементів підсилення і бетону протягом усього навантаження. При цьому, оскільки підсилення композитними матеріалами було застосоване в зоні розтягу, то це свідчить, що збільшення несучої здатності було досягнуто за рахунок збільшення площі стиснутої зони балок внаслідок зміщення нейтральної осі і перерозподілу напружень.

4. Встановлено, що застосування композитної стрічки SikaCarbodurS512 (25 мм × 1.2 мм) дозволяє повністю відновити несучу здатність при пошкодженнях робочої арматури в межах до 16 мм (що складає близько 36 % від початкової ефективної площі арматури). При цьому, для зразків, що моделювали початкові етапи корозії (ПБ-2- 20% і ПБ-3- 36%) було зафіксовано ефект відновлення несучої здатності в межах 105-112%, в порівнянні з контрольними зразками (якщо прийняти для непошкоджених зразків серії КБ-0 як базове значення несучої здатності для порівняння 100%). Для зразків, що моделювали кінцеві етапи корозії (при пошкодженні до ефективного діаметру 14 і 12 мм (51 % і 64 % від початкової площі арматури) використання підсилення дозволило відновити несучу здатність на 95 % і 79 %, відповідно (якщо прийняти для непошкоджених зразків серії КБ-0 -100%). Для зразків без пошкоджень (серія ПБ-1) зростання несучої здатності в порівнянні з КБ-0 при підсиленні складало 35% (або 135% якщо для КБ-0 прийняти 100% несучої здатності).

5. Несучу здатність підсилених зразків також порівнювали з результатами для зразків з еквівалентними пошкодженнями, але без підсилення. Відповідно, для серії ПБ-2 несуча здатність зросла на 30%, ПБ-3,-на 65%, для ПБ-4,- на 85-90%, а для ПБ-5,-на 94-110%. Отже, необхідно відмітити, що найбільший ефект підсилення мав місце для зразків з найбільшим ступенем пошкодження робочої арматури.

6. Порівняльний аналіз впливу підсилення на деформативність зразків показав значне зменшення прогинів для всіх серій в порівнянні з балками з еквівалентними пошкодженнями, але без підсилення. Зокрема, зменшення прогинів в момент вичерпання несучої здатності для серії ПБ-2 становило 15%, ПБ-3,-32%, ПБ-4,-24-25%, ПБ-5,-14-18%. При порівнянні з контрольними зразками вплив підсилення на

значення прогинів в момент вичерпання несучої здатності був незначним, однак можна відмітити зростання максимальних прогинів (після фізичного руйнування бетону стиснутої зони).

7. Необхідно також відмітити, що згинальний момент, при якому було досягнуто граничний прогин збільшився вдвічі (на 107-123 % для ПБ-5, 97-99%, - для ПБ-4, 110-129 %, - для ПБ-3), а на 37-45% для ПБ-2 в порівнянні з пошкодженими і непідсиленими балками. При цьому, застосування композитної стрічки призвело до збільшення моменту досягнення граничного прогину на 30-32 % (в порівнянні між КБ-0 і ПБ-1). Можна зробити висновок, що ефективність підсилення за деформативністю зростає при більших ступенях пошкодження робочої арматури.

8. Відсоток використання композитної стрічки (згідно з максимальними деформаціями) був в однакових межах для всіх серій (76-84 % згідно з FIB Bulletin і 29-32%, згідно з Sika). При цьому найбільший ступінь використання композитної стрічки за граничними деформаціями зафіксовано для балок з більшим ступенем пошкодження.

9. Для всіх експериментальних результатів відхилення в межах одної серії і відхилення між даними, заміряними цифровою кореляцією зображень і суб-мікронними індикаторами не перевищували 5-7%, що є задовільним для інженерних задач.

РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ І ДЕФОРМАТИВНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

4.1. Методика розрахунку несучої здатності залізобетонних балок за деформаційною моделлю

4.1.1. Розрахунок напружень і деформацій в залізобетонному перерізі при дії згинальних моментів

Згідно з чинними нормами проектування в Україні розрахунок і проектування залізобетонних елементів виконують згідно з ДБН В.2.6-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення» [14] і ДСТУ Б В.2.6-156:2010 «Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування» [19]. При цьому, алгоритм розрахунку за нормативними документами базується на застосуванні деформаційної моделі з врахуванням нелінійної діаграми деформування для бетону « σ_c - ϵ_c » і дволінійної діаграми деформування для арматури « σ_s - ϵ_s ». Використання деформаційної моделі дозволяє отримати інформацію про розподіл деформацій і напружень по всій висоті перерізу довільної форми з довільною конфігурацією армування при заданому рівні навантаження. при використанні деформаційної моделі для розрахунку несучої здатності залізобетонного перерізу попередньо приймають виконання наступних гіпотез:

- за розрахунковий приймаємо усереднений переріз, що відповідає середнім деформаціям бетону та арматури по довжині блока між тріщинами (при їх наявності);
- для розрахункового перерізу приймаємо виконання гіпотези про лінійний розподіл деформацій по його висоті;
- забезпечується гіпотеза плоских перерізів, згідно з якою перерізи, що були плоскими до деформування, залишаються плоскими;
- деформації у звичайній арматурі однакові з бетоном, що її оточує, як при розтягу, так і при стиску;

- відносні деформації бетону визначають з використанням нелінійної діаграми, а для арматури застосовують дволінійну діаграму деформування;
- для опису діаграми деформування бетону використовують поліном 5-го степеня з коефіцієнтами, визначеними експериментальними випробуваннями з побудовою повної діаграми руйнування;
- приймаємо, що найбільший приріст деформацій матиме місце в усередненому перерізі з найбільшими напруженнями;
- роботу бетону в розтягнутій зоні допускається не враховувати, а несучу здатність розтягнутої зони визначається лише розрахунковим опором арматури.

Згідно з основними положеннями розрахунку залізобетонних конструкцій, підсилених композитними матеріалами, регламентованими ДП НДІБК [21] приймається виконання всіх вище наведених гіпотез [14, 19] та доповнень наведених нижче:

- деформації в зовнішніх елементах підсилення композитними матеріалами або приріст деформацій у попередньо напружених елементах (при підсиленні конструкцій завантажених тільки власною масою) однакові з умовними деформаціями бетону найбільш розтягнутої грані $\varepsilon_{c(2)}$;
- деформації зовнішніх елементів підсилення або приріст деформацій у попередньо напружених елементах при підсиленні завантажених конструкцій розраховують з врахуванням реального напружено-деформованого стану конструкції, яку підсилюють;
- зв'язок між деформаціями і напруженнями у композитних матеріалах підсилення приймають у вигляді діаграми, що відповідає закону Гука ($\sigma_f = \Delta \varepsilon_f E_f$);
- для попередньо напружених елементів з композитних матеріалів напруження визначають з врахуванням початкових деформацій від попереднього напруження.

Серед критеріїв вичерпання несучої здатності виділяють наступні [21]:

- втрата рівноваги між внутрішніми та зовнішніми зусиллями, як екстримальний критерій;

- руйнування стиснутого бетону (при досягненні граничних значень деформацій ε_{cul});
- розрив розтягнутих арматурних стержнів (при досягненні граничних значень деформацій ε_{ud});
- відшарування зовнішніх елементів композитного підсилення;
- розрив композитного підсилення при досягненні граничних значень деформацій ε_{fi} .

Згідно з вказівками нормативних документів з проектування бетонних і залізобетонних конструкцій [14] розглянемо 2 форми рівноваги залізобетонного перерізу і запишемо відповідні рівняння рівноваги. Для першої форми рівноваги (див. рис.4.1, б) [21]:

$$\frac{b \cdot f_{cd}}{\bar{\aleph}} \cdot \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+1} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}^{k+1} - \varepsilon_{c(2)}^{k+1}}{\varepsilon_{c1}^{k+1}} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} = 0, \quad (4.1)$$

$$\frac{b \cdot f_{cd}}{\bar{\aleph}^2} \cdot \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}^{k+2} - \varepsilon_{c(2)}^{k+2}}{\varepsilon_{c1}^{k+2}} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} \cdot (x_1 - z_{si}) + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} \cdot (x_1 - z_{fi}) = M. \quad (4.2)$$

Для другої форми рівноваги (див. рис.4.1,в) [21]:

$$\frac{b \cdot f_{cd}}{\bar{\aleph}} \cdot \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+1} \gamma^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} = 0, \quad (4.3)$$

$$\frac{b \cdot f_{cd}}{\bar{\aleph}^2} \cdot \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \gamma^{k+2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} \cdot (x_1 - z_{si}) + \sum_{i=1}^n \sigma_{fi} A_{fi} \cdot (x_1 - z_{fi}) = M, \quad (4.4)$$

де b - ширина перерізу, $\varepsilon_{c(1)}$ - деформації стиснутої фібри бетону, $\varepsilon_{c(2)}$ - усереднені деформації розтягнутої фібри бетону, $\bar{\aleph}$ - значення кривизни зігнутої осі, $\bar{\aleph} = \aleph / \varepsilon_{c1}$ - відносна кривизна зігнутої осі, $\gamma = \varepsilon_{c(1)} / \varepsilon_{c1}$ - коефіцієнт співвідношення деформацій, $x_1 = \varepsilon_{c(1)} / \bar{\aleph}$ - висота стиснутої зони, z_{si} - відстань від і-го шару арматури до найбільш стиснутої грані перерізу, z_{fi} - відстань від і-го шару композитного армування до найбільш стиснутої грані перерізу, M - значення згинального моменту в перерізі, σ_{si} - напруження в і-му шарі армування, σ_{fi} -

напруження в i -му шарі армування композитною арматурою, A_{si}, A_{fi} - площа перерізу i -го шару звичайної і композитної арматури, відповідно.

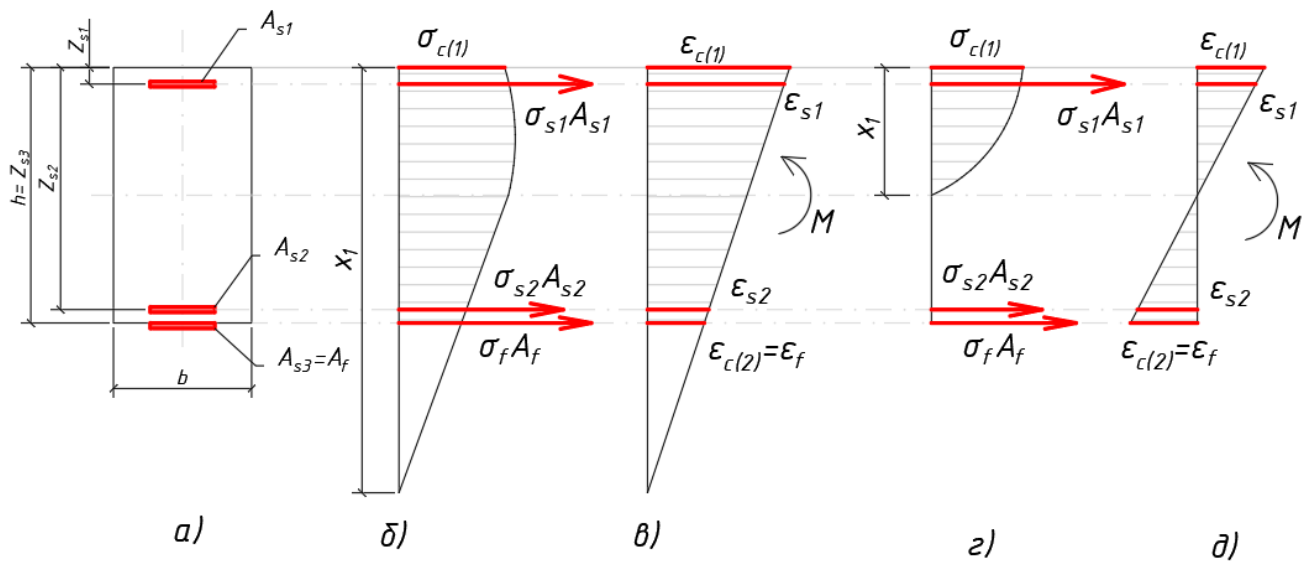


Рис.4.1. Схема напружень і деформацій в залізобетонному перерізі: а) - поперечний переріз елемента; б) - епюра напружень у випадку 1-ї форми рівноваги; в) - епюра деформацій у випадку 1-ї форми рівноваги; г) - епюра напружень для 2-ї форми рівноваги; д) - епюра деформацій для 2-ї форми рівноваги.

Напруження в довільному шарі армування звичайної і композитної ненапруженої і попередньо напруженої арматури можна визначити за формулами:

$$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s, \quad (4.5)$$

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f, \quad (4.6)$$

де E_s, E_f - значення модуля пружності звичайної і композитної арматури, відповідно, а деформації визначаються за формулами:

$$\varepsilon_{si} = \aleph \cdot (x_1 - z_{si}) + \varepsilon_{si,0}, \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_{fi} = \aleph \cdot (x_1 - z_{fi}) + \varepsilon_{fi,0}, \quad (4.8)$$

де $\varepsilon_{si,0}, \varepsilon_{fi,0}$ - значення початкових (до прикладання зовнішніх зусиль) деформацій в i -му шарі звичайної і композитної арматури, відповідно.

Формули (4.1-4.2) і (4.3-4.4) являють собою системи рівнянь з 2-ма невідомими, що розв'язуються ітераційним підбором, методом поступових наближень з контролем критеріїв вичерпання несучої здатності на кожному етапі. При цьому використовуються деформаційний підхід до розрахунку несучої здатності, згідно з положеннями чинних норм [14]. Блок-схема розрахункового алгоритму наведена на рис. 4.2.

Приймаємо наступні вихідні характеристики матеріалів: для бетону класу С32/40,- $\varepsilon_{cu1,ck} = 0.003$; $\varepsilon_{c1,ck} = 0.00176$; $f_{ck} = 29$ МПа, α_k ,-згідно з ДБН В.2.6-98:2009 [14]; для композитної стрічки,- $\varepsilon_{fu} = 0.013$; $E_f = 160000$ МПа; для сталеві арматури,- $\varepsilon_{yk} = 0.00284$; $f_{yk}(x_i)$ -згідно з регресійною моделлю у формі рівняння

$$\text{Больцмана (див. Додаток В): } f_{yk}(x) = 568.40 \pm 2.75 + \frac{441.00 \pm 0 - 568.40 \pm 2.75}{1 - e^{\frac{x-14.83 \pm 0.09}{1.06 \pm 0.07}}}.$$

1. На першому етапі приймаємо деформації бетону $\varepsilon_{c(1)} = \Delta \varepsilon_{c(1)}^{(0)} = 0, 1\varepsilon_{cu1}, \varepsilon_{c(2)}^{(0)} = 0$.

2. Обраховуємо величини $\aleph$, $\bar{\aleph}$, γ , x_1 , σ_{si} :

$$\aleph = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c(2)}}{h}, \quad (4.9)$$

$$\bar{\aleph} = \frac{\aleph}{\varepsilon_{c1}}, \quad (4.10)$$

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c1}}, \quad (4.11)$$

$$x_1 = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\aleph}, \quad (4.12)$$

$$\sigma_{si} = \varepsilon_{si} \cdot E_{si} = E_{si} \cdot \aleph(x_1 - Z_{si}). \quad (4.13)$$

3. Для другої форми рівноваги визначаємо зусилля N , приймаючи коефіцієнти α_k згідно з додатком Д [14] з використанням рівняння:

$$\frac{b \cdot f_{cd}}{\bar{\aleph}} \cdot \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+1} \gamma^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} - N = 0, \quad (4.14)$$

Оскільки для випадку згину $N=0$, то подальший розрахунок виконуємо методом поступового підбору, збільшуючи деформації на розтягнутій грані. Приймаємо $\varepsilon_{c(2)}^{(0)} = 0.01\varepsilon_{cu1}$ і повторюємо дії, наведені в п. 2 і 3. Даний цикл алгоритму виконуємо доти, доки $N \approx 0$ з необхідною для інженерного розрахунку точністю.

4. Після підстановки визначених деформацій в рівняння (4.4) отримаємо вираз для визначення згинального моменту, що відповідає першій точці на діаграмі стану для залізобетонного перерізу:

$$M = \frac{b \cdot f_{cd}}{\bar{s}^2} \cdot \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c(1)}^{k+2} - \varepsilon_{c(2)}^{k+2}}{\varepsilon_{c1}^{k+2}} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} \cdot (x_1 - z_{si}), \quad (4.15)$$

5. Наступні точки діаграми стану отримуємо, повторюючи дії, наведені в п. 2-4 і збільшуючи деформації стиснутої фібри бетону:

$$\varepsilon_{c(1)}^{(2)} = \varepsilon_{c(1)}^{(1)} + \Delta\varepsilon_{c(1)}. \quad (4.16)$$

Деформації розтягнутого бетону $\varepsilon_{c(2)}^{(2)}$ приймаємо рівними, визначеним в п.3. Дії повторюємо, доки буде досягнуто рівня $N \approx 0$ з необхідною точністю. Протягом всього розрахунку контролюємо рівень напружень в усіх шарах арматури:

$$\sigma_{si} \leq f_{yk}. \quad (4.17)$$

Розрахунки було виконано з використанням ітераційного підходу в в ПК Excel.

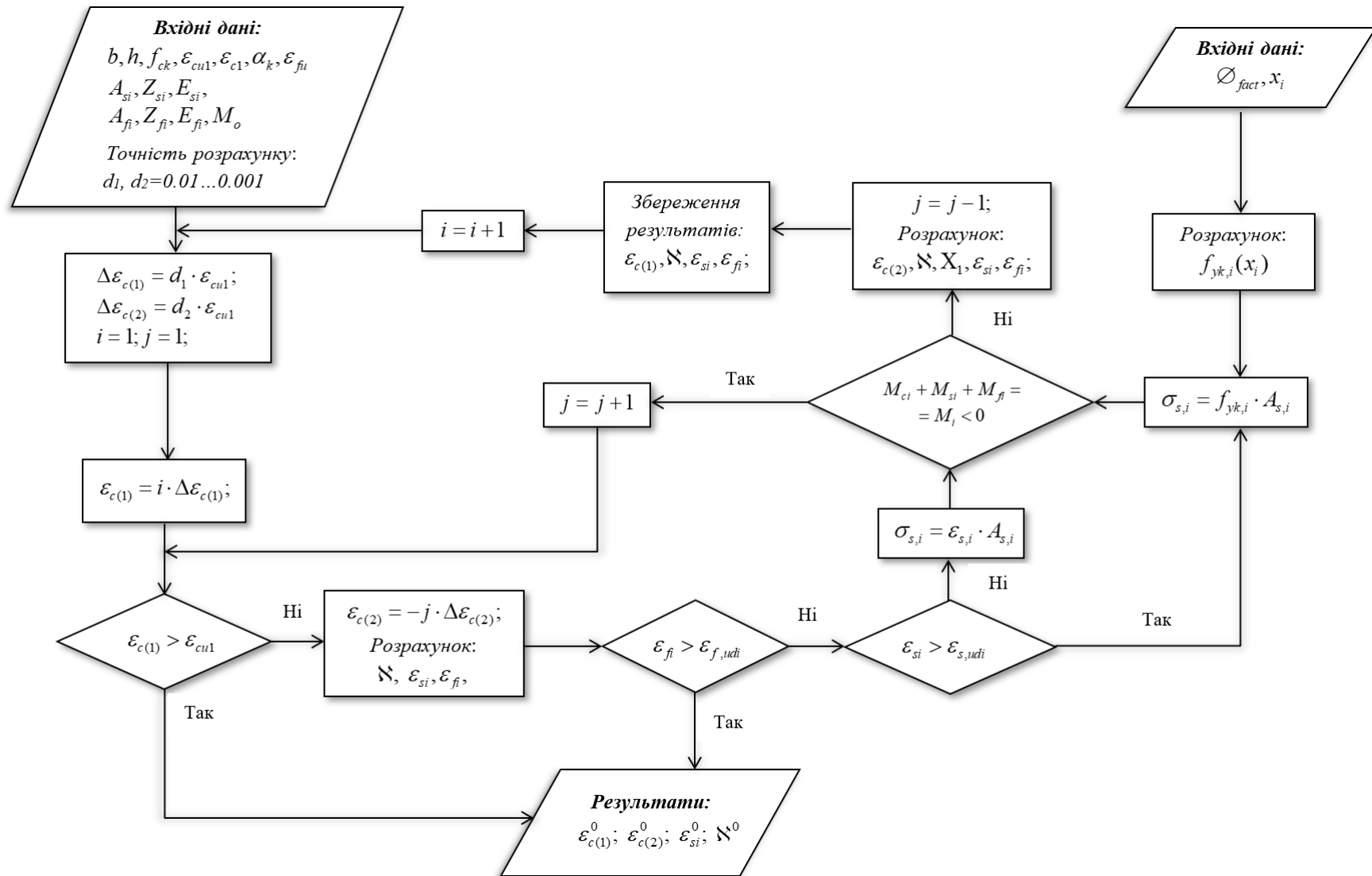


Рис.4.2. Блок-схема визначення напружено-деформаційного стану нормального перерізу залізобетонного згинального елемента

4.1.2. Розрахунок прогинів і ширини розкриття тріщин

Розрахунок прогинів виконуємо згідно з рекомендаціями відповідного нормативного документа ДСТУ Б В.1.2-3:2006 [18] за формулою:

$$f_m = \int_0^l \frac{1}{r} M_x \left(\frac{1}{r} \right)_x dx, \quad (4.18)$$

де M_x – згинальний момент в перерізі «х-х» від одиночної сили, яка прикладена у напрямку певного переміщення; $\left(\frac{1}{r} \right)_x = \frac{1}{\rho} = \aleph$ – кривизна перерізу,

визначена з використанням дійсних характеристик матеріалів розрахунком за II групою граничних станів і побудованим графіком $M_{ексн} - \aleph$, l – довжина балки.

Для балок постійного поперечного перерізу, що працюють на згин для визначення прогинів формула приймає вигляд:

$$f = \frac{1}{r} k_m l^2, \quad (4.19)$$

де k_m – коефіцієнт, прийнятий згідно з табл. 5.5 [19] і схемою за рис. 4.3:

$$k_m = \frac{1}{8} - \frac{a^2}{6l^2}, \quad (4.20)$$

де a – відстань до прикладання першої сили, відповідно до схеми завантаження (рис.4.3).

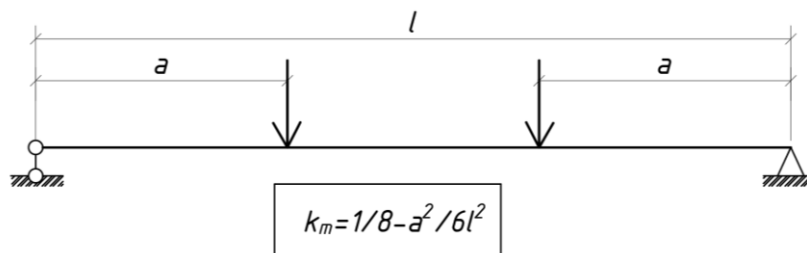


Рис.4.3. Схема для визначення коефіцієнта k_m , згідно ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [19]

Для розрахунку ширини розкриття тріщин буде використано вказівки розділу 5.3 ДСТУ Б В.2.6-156 [19]. Для II групи граничних станів виконуємо розрахунки для побудови залежності $M_{ексн} - \aleph$, згідно з вище наведеною методикою. При цьому використовуємо при розрахунку характеристичні значення міцності бетону

і арматури (f_{ck}, f_{yk}) і коефіцієнти полінома для II групи граничних станів. За результатами розрахунку для конкретного експлуатаційного значення згинального моменту перерізу $M_{експ}$ визначаємо напруження в усіх шарах арматури. Ширина розкриття тріщин w_k визначається виразом:

$$w_k = s_{r,\max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}), \quad (4.21)$$

$$\text{де } \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (4.22)$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}, \quad (4.23)$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 \cdot A_p}{A_{c,eff}}, \quad (4.24)$$

де σ_s -напруження в розтягнутій арматурі в перерізі з тріщиною, E_{cm}, E_s -значення модулів пружності бетону і арматури, відповідно, A_p, A_s -площа попередньо напруженої і звичайної арматури, ξ_1 - коефіцієнт міцності зчеплення попередньо напруженої і звичайної арматури, який в даному випадку опускаємо через відсутність передньо напруженої арматури.

де k_t -коефіцієнт, що залежить від тривалості навантаження (0.6,-для короткотривалого навантаження, 0.4,- для довготривалого навантаження), $f_{ct,eff} = f_{ct,m}$. Максимальний крок тріщин визначається рівнянням:

$$s_{r,\max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \varnothing}{\rho_{p,eff}} \quad (4.25)$$

де k_1 -коефіцієнт, що враховує характеристик зчеплення (0.8- для арматури із високим зчепленням, 1.6-для гладких стрижнів), k_2 -коефіцієнт, що враховує розподіл деформацій (0.5-для згину, 1.05 -для чистого розтягу), $k_3 = 3.4$, $k_4 = 0.425$, c -захисний шар бетону.

4.2. Аналіз результатів розрахунку несучої здатності і деформативності

В даному розділі наводимо результати оцінювання несучої здатності і деформативності згідно з ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [19]. Особливістю роботи є врахування неоднорідних міцнісних характеристик термічно-зміцненої арматури, згідно з спеціально розробленою регресійною моделлю (див. Додаток В). Для всіх залізобетонних балок були побудовані графіки деформацій стиснутого бетону і розтягнутої арматури в координатах « $M-\varepsilon \times 10^3$ », які порівнювались з експериментальними результатами. При цьому було прийнято наступне правило знаків: «+», - деформації стиску, «-», - деформації розтягу.

Згідно з отриманими результатами (див. рис.4.4), момент початку текучості M_r^{th} (умовної) для балок контрольної серії КБ-0 становив 18.86 кНм, а момент вичерпання несучої здатності M_d^{th} , -20.54 кНм. При цьому відхилення між визначеними теоретично і заміряними експериментально величинами не перевищило 6 %, що є досить високою точністю (див. табл. 4.1). Розраховані, згідно з методикою в п.п. 4.1.2 прогини також порівнювались з результатами експерименту (див. рис.4.5, табл.4.2). Як бачимо, різниця між максимальними прогинами згідно з розрахунком і експериментально заміряними становить 3.93 % і 7.62 % (за індикаторами і ЦКЗ), зокрема через можливість використання методики ЦКЗ на значно пізніших етапах експерименту і, відповідно, замірювати більші деформації.

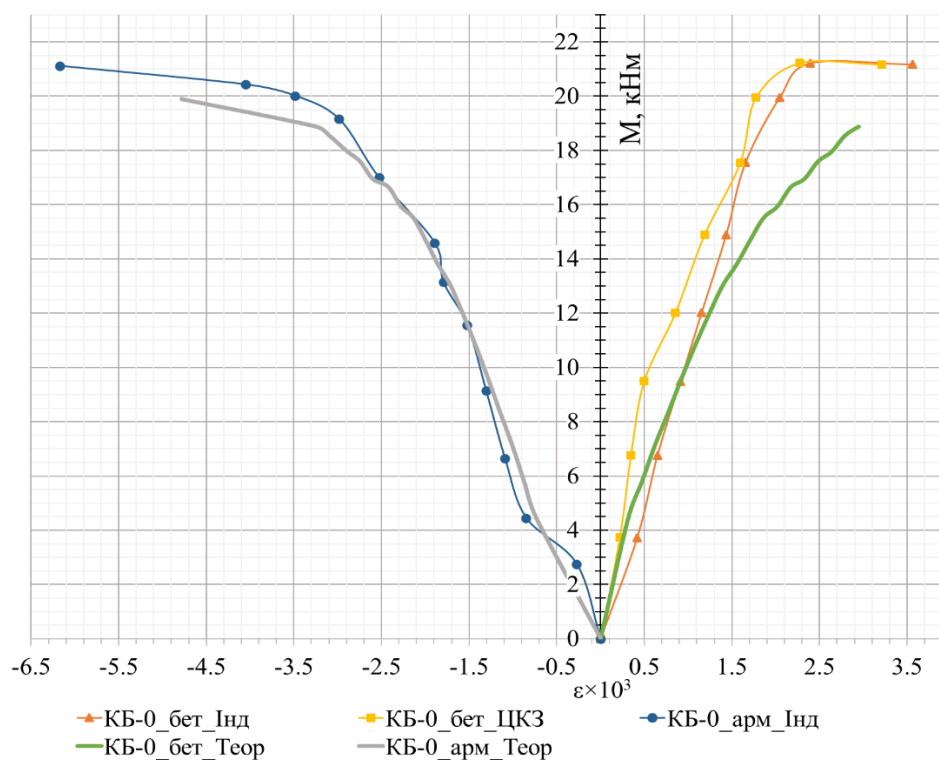


Рис.4.4. Теоретичні графіки деформацій стиснутого бетону (KB-0_бет_Теор) і розтягнутої арматури (KB-0_арм_Теор) в координатах «М- $\epsilon \times 10^3$ » для балок серії KB-0 і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.2)

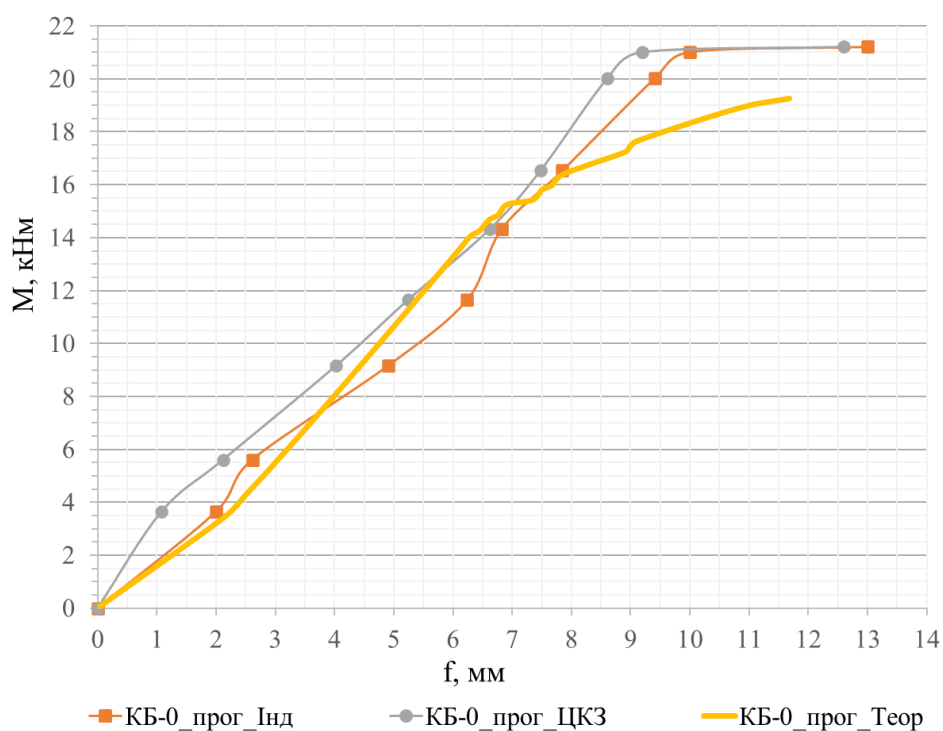


Рис.4.5. Теоретичні графіки прогинів (KB-0_прог_Теор) і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.2)

Теоретичні графіки деформацій стиснутого бетону, розтягнутої арматури і стрічки для підсилених балок без пошкоджень (серія ПБ-1) і відповідні їм експериментальні графіки наведено на рис. 4.6. Для цієї серії відхилення фактичного моменту настання текучості від теоретичного M_r^{th} становить близько 9%, тоді як момент вичерпання несучої здатності відрізняється незначно ($M_d^{th} = 20.54$ кНм, див. табл. 4.1). Дана різниця знаходиться в задовільних межах і, здебільшого спричинена певною консервативністю чинних норм розрахунку і проектування. Для підсилених зразків також аналізували максимальні деформації в стрічці і прогнозований теоретично відсоток її використання (див. табл. 4.3). Як бачимо, різниця між експериментальними і теоретичними значеннями ε_f не перевищують 5%, в сторону нижчих даних згідно з експериментом.

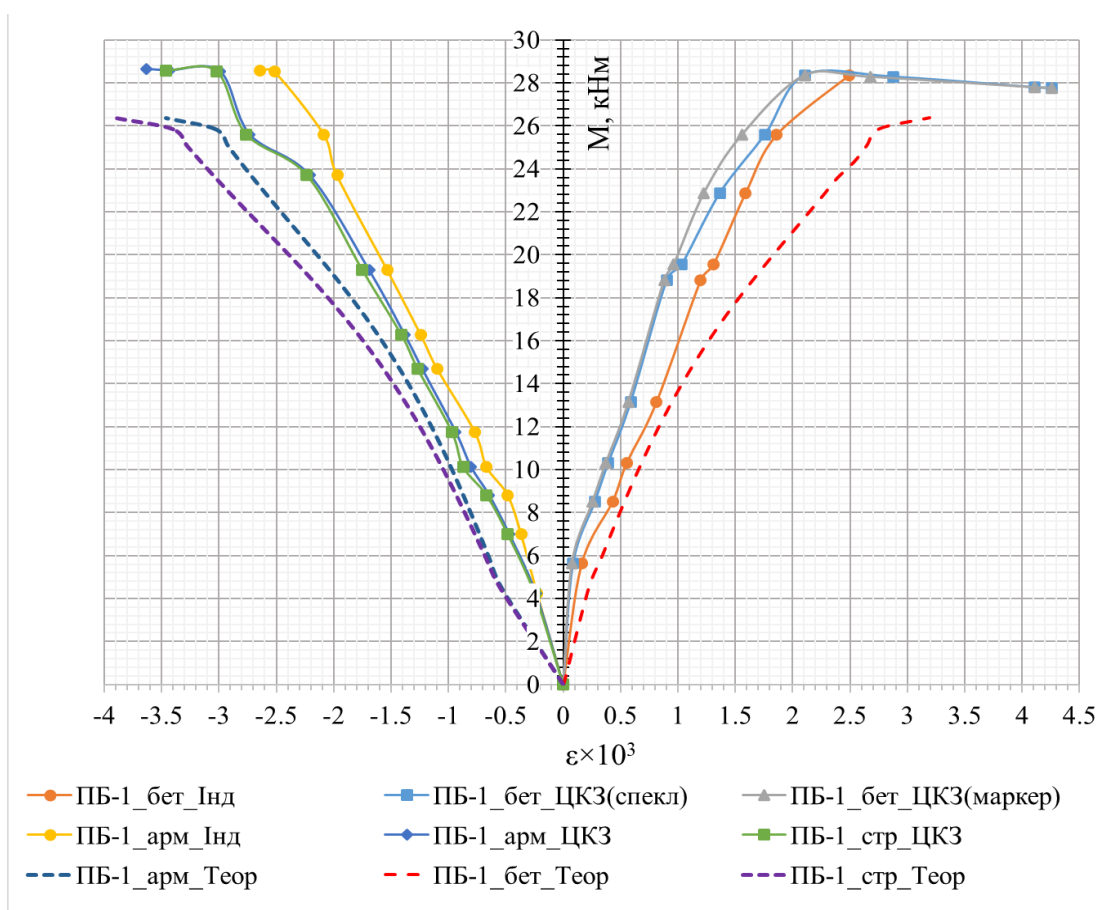


Рис.4.6. Теоретичні графіки деформацій стиснутого бетону (ПБ-1_бет_Теор), розтягнутої арматури (ПБ-1_арм_Теор) і стрічки (ПБ-1_стр_Теор) в координатах «М- $\varepsilon \times 10^3$ » для балок серії ПБ-1 і їх порівняння з експериментальними (див.

п.п.3.2.3)

Графіки розвитку прогинів для зразків даної серії наведено на рис. 4.7, а чисельні результати,- в табл. 4.2. З аналізу отриманих експериментальних і теоретичних значень бачимо, що при тому що їх характер графіків є дуже близьким, максимальні прогини, передбачені теоретичним розрахунком є на 13-15% меншими за заміряні експериментально. Натомість, момент, що відповідає досягненню граничного прогину відрізняється незначно (в межах 7 %). Такий результат, загалом, є задовільним, однак свідчить про можливість подальших досліджень деформативності залізобетонних конструкцій, підсилених композитними матеріалами.

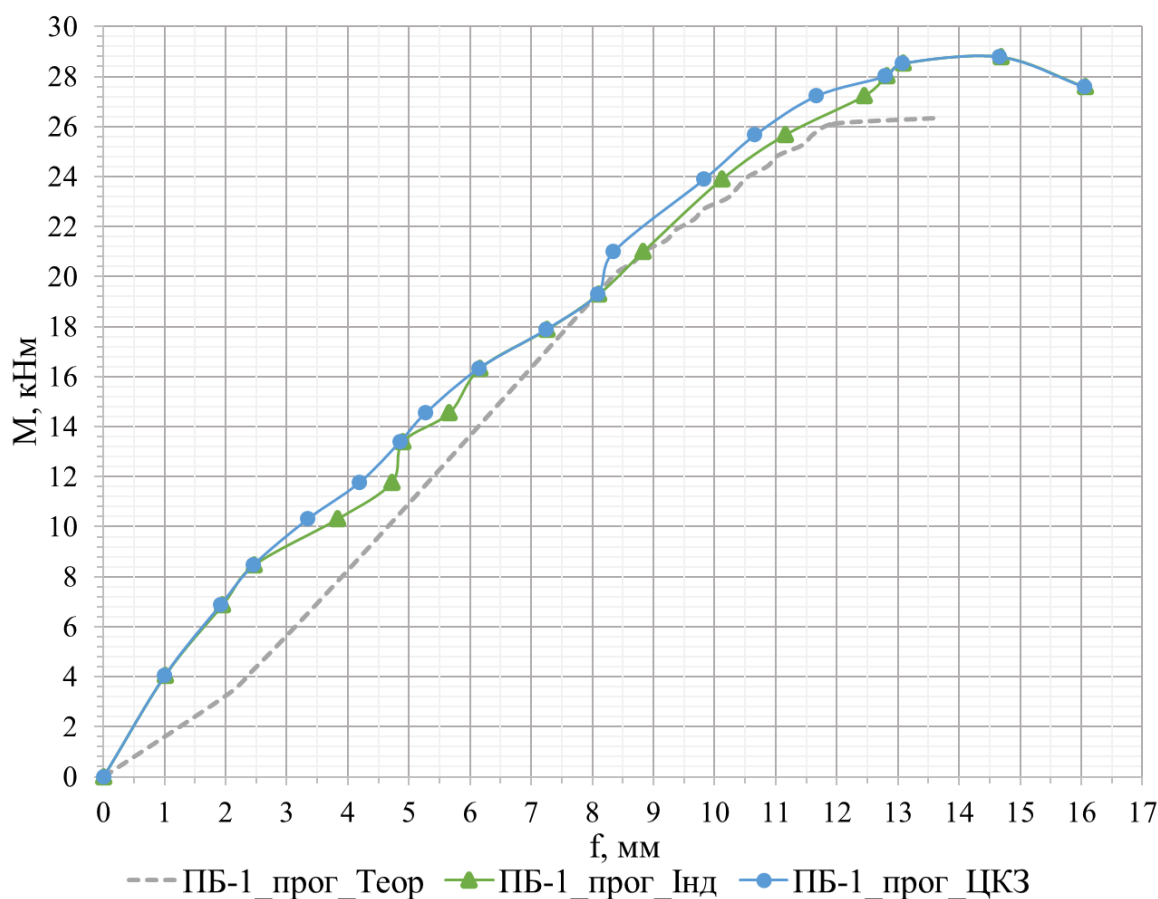


Рис.4.7. Теоретичні графіки прогинів (ПБ-1_прог_Теор) і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.3)

Результати теоретичного розрахунку несучої здатності і деформативності для зразків з початковим етапом корозії (серія ПБ-2 з $\varnothing_{\text{факт}}=18$ мм) і їх порівняння з експериментальними даними наведено нижче (див. рис. 4.8-4.9).

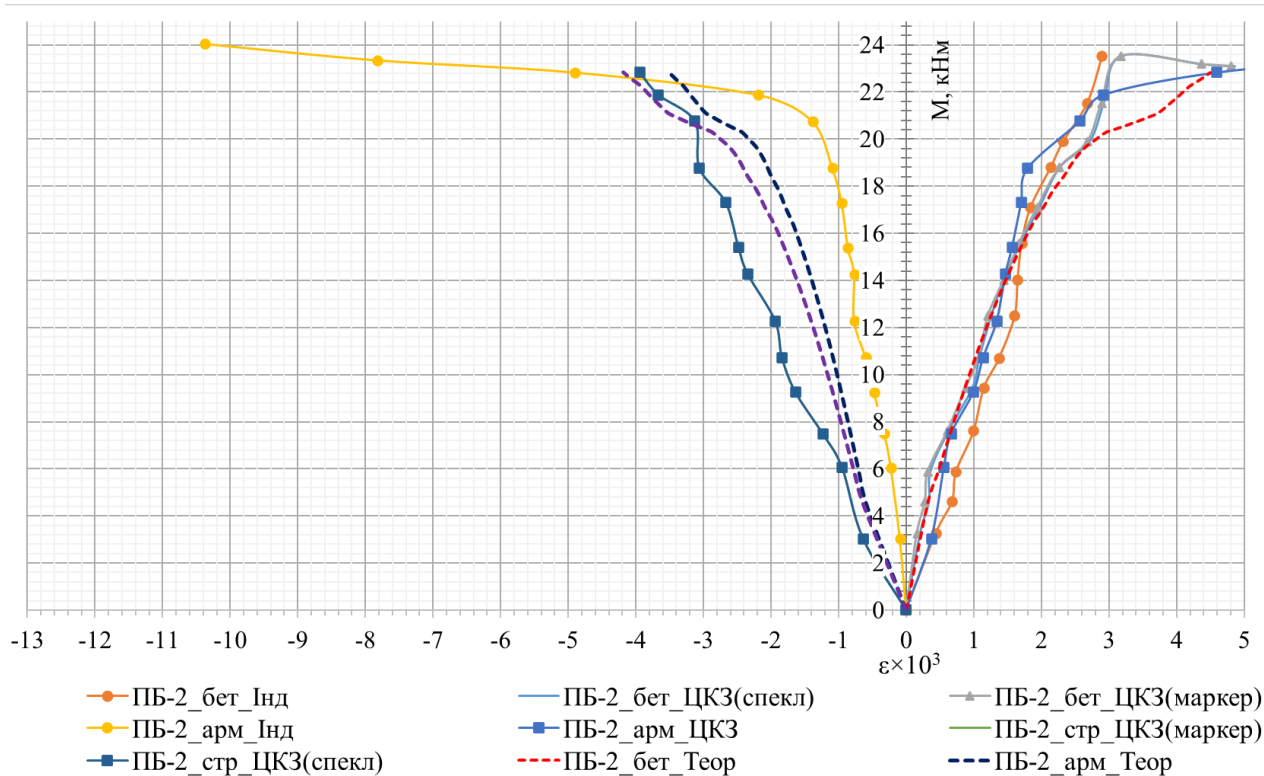


Рис.4.8. Теоретичні графіки деформацій стиснутого бетону (ПБ-2_бет_Теор), розтягнутої арматури (ПБ-2_арм_Теор) і стрічки (ПБ-2_стр_Теор) в координатах «М- $\epsilon \times 10^3$ » для балок серії ПБ-2 і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.3)

Як бачимо, моменти досягнення текучості в сталевій арматурі ($M_r^{th} = 20.28$ кНм) і вичерпання несучої здатності ($M_d^{th} = 22.84$ кНм), визначені розрахунком відрізняються від експериментальних незначно (відхилення не перевищують 10 %, див табл.4.1). Отримані згідно з розрахунком деформації в стрічці становлять $\epsilon_f = 4.18 \times 10^{-3}$, що на 8.8 % більше за експериментальні значення (див. табл. 4.3). Дане відхилення є в допустимих межах і свідчить про певний додатковий запас, закладений в нормах проектування. Різниця між значеннями експериментальних і теоретичних значень максимальних прогинів становила 11-15 % при нижчому теоретичному значенні ($f_{max}^{th} = 13.95$ мм). При цьому відхилення в значеннях згинальних моментів, що відповідали досягненню граничного нормативного прогину є незначним (менше 5% в порівнянні розрахованих значень з експериментальними).

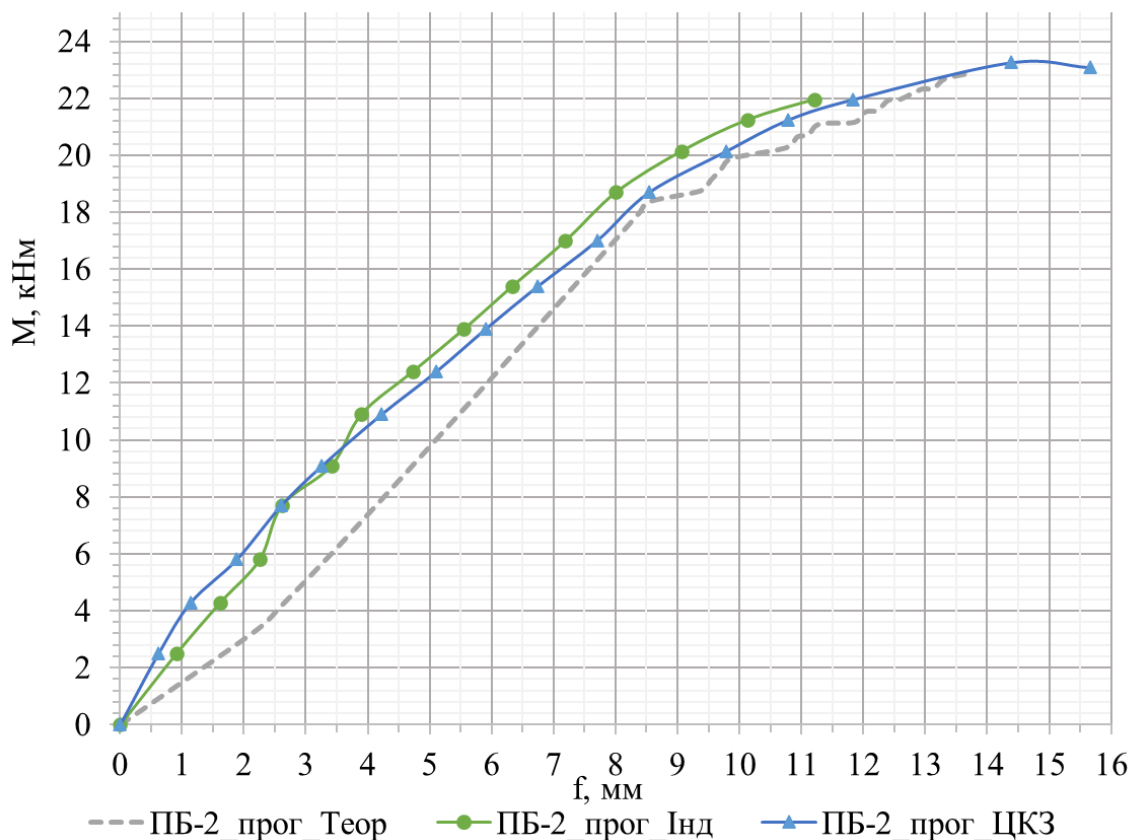


Рис.4.9. Теоретичні графіки прогинів (ПБ-2_прог_Теор) і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.3)

Аналогічно до попередніх зразків, було проведено теоретичні розрахунки несучої здатності і деформативності для зразків із корозією рівня $\Delta\varnothing=4$ мм, що відповідно до рівня пошкоджень арматури в зразках серії ПБ-3. Відповідні графіки і їх порівняння з результатами експериментальних випробувань наведено на рис. 4.10-4.11. Відхилення в розрахункових і експериментальних моментах є дуже близькими із незначним перевищенням (в межах 6-7% для моментів досягнення текучості, див табл.4.1) в експериментальних результатах. При цьому, згідно з теоретичним розрахунком момент вичерпання несучої здатності становить $M_d^{th}=20.18$ кНм, що на 10.5 % менше за фактичний згідно з експериментом (див. рис. 4.10). Аналогічні відхилення було зафіксовано в експериментальних і теоретичних максимальних деформаціях в композитній стрічці ($\epsilon_f=4.42 \times 10^{-3}$, див. табл. 4.3). Дане відхилення є в допустимих межах і свідчить про певний додатковий запас, закладений в нормах проектування.

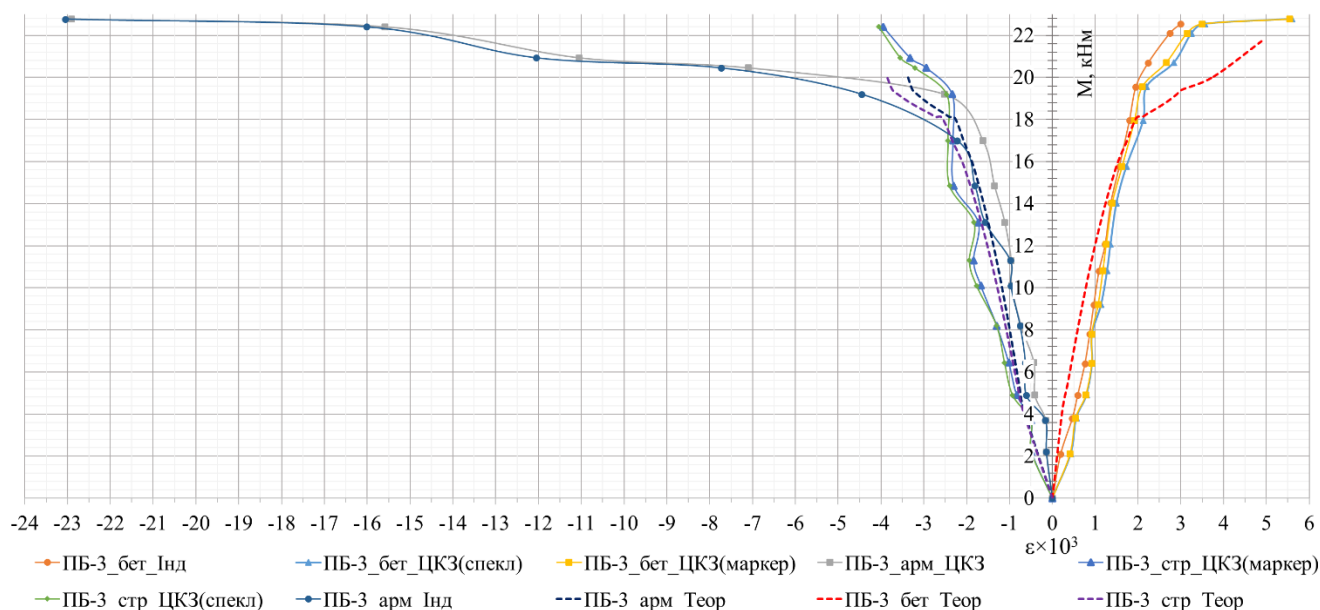


Рис.4.10. Теоретичні графіки деформацій стиснутого бетону (ПБ-3_бет_Теор), розтягнутої арматури (ПБ-3_арм_Теор) і стрічки (ПБ-3_стр_Теор) в координатах «М- $\varepsilon \times 10^3$ » для балок серії ПБ-3 і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.3)

Теоретичне значення максимального прогину на етапі вичерпання несучої здатності становило $f_{\max}^{th} = 13.81$ мм, що не перевищує граничних нормативних значень і відрізняється від експериментальних значень на 10.7 % в нижчу сторону.

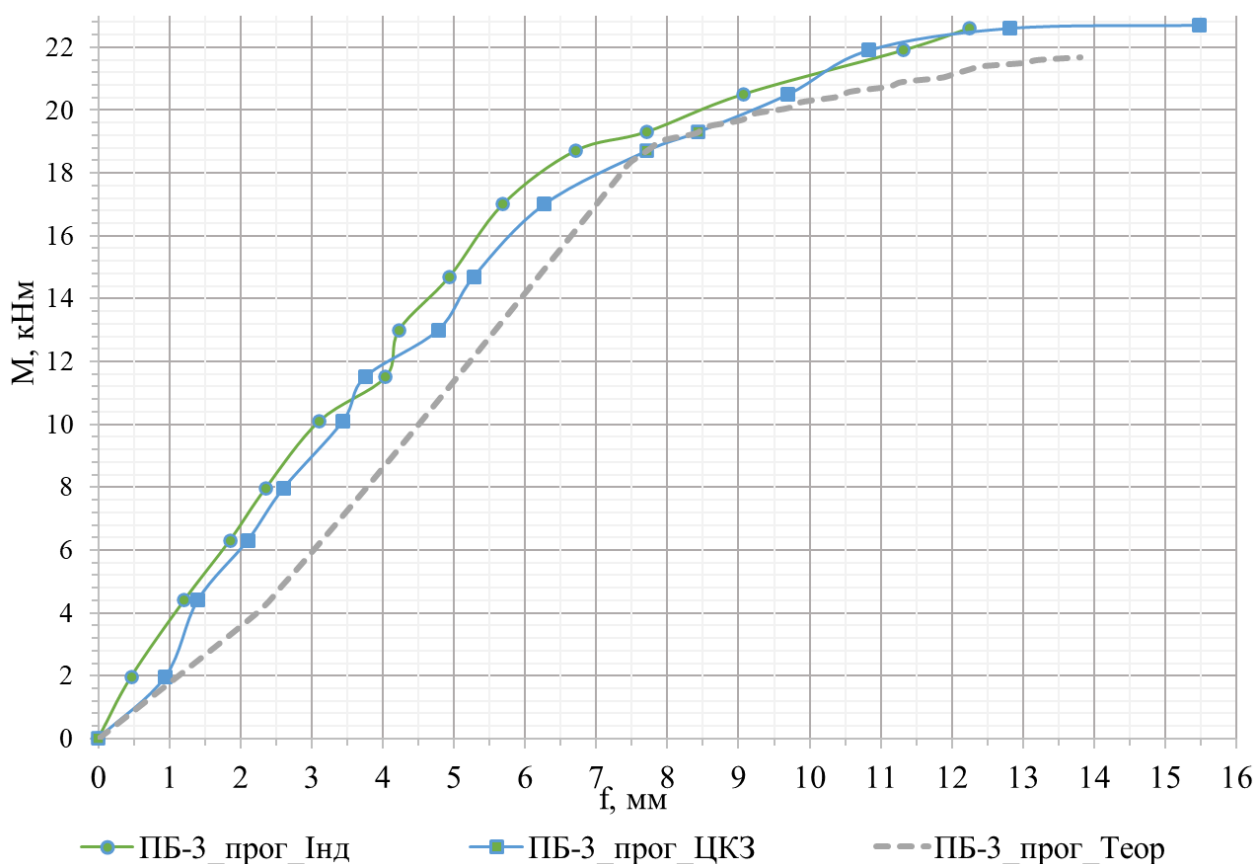


Рис.4.11. Теоретичні графіки прогинів (ПБ-3_прог_Теор) і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.3)

Графіки відносних деформацій в бетоні, арматурі і композитній стрічці згідно з теоретичним розрахунком і експериментальними даними для зразків серії ПБ-4 наведено на рис. 4.12. Як бачимо, розрахунковий момент досягнення текучості арматури ($M_r^{th} = 17.52 \text{ кНм}$, див табл.4.1) відрізняється від експериментальних даних на 9% і на 5 %, порівняно з заміряними індикаторами і цифровою кореляцією зображень, відповідно. Різниця в згинальних моментах на етапах вичерпання несучої здатності була також в допустимих межах (7-9%, див табл.4.1).

Прогнозований розрахунком ступінь використання композитного підсилення (теоретичне значення $\epsilon_f = 4.45 \times 10^{-3}$, див. табл. 4.3) для цих зразків відрізняється від фактичного експериментального на 11%, що є в задовільних межах.

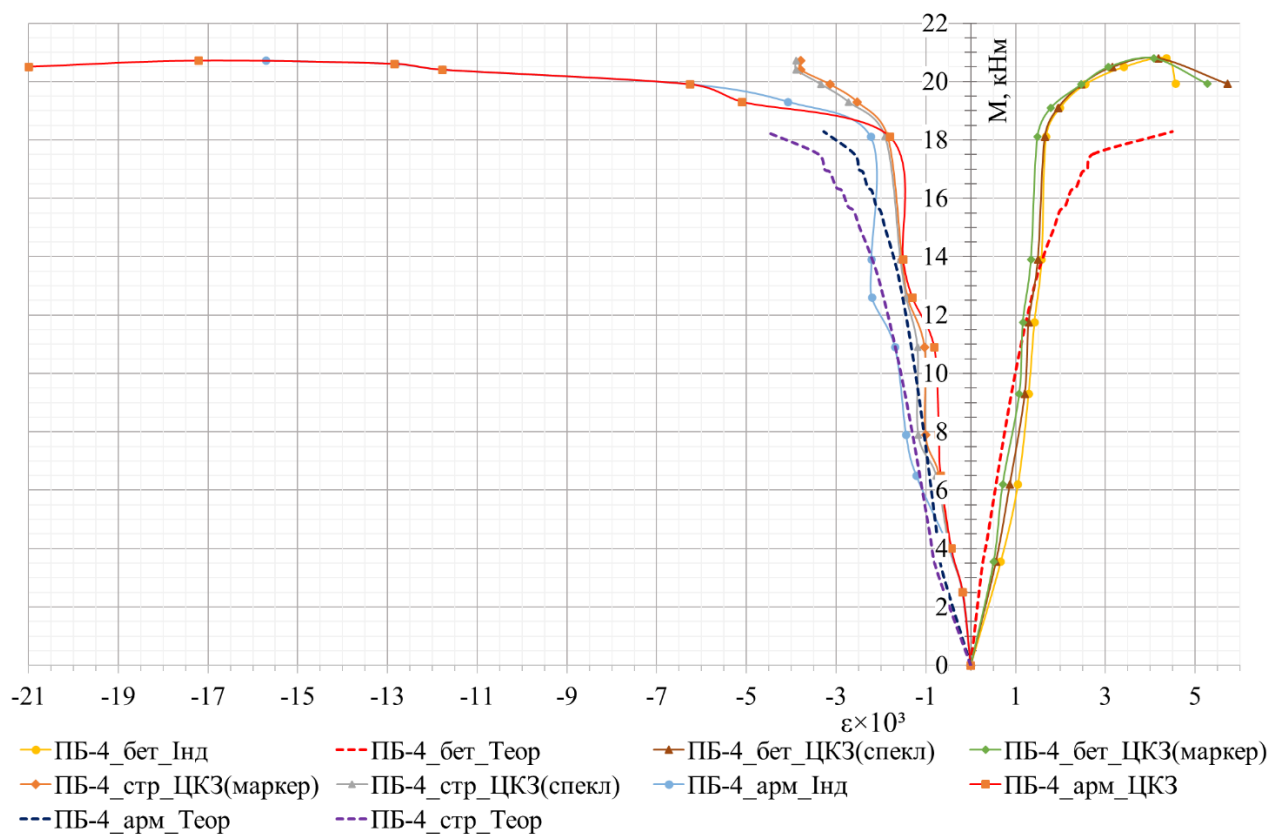


Рис.4.12. Теоретичні графіки деформацій стиснутого бетону (ПБ-4_бет_Теор), розтягнутої арматури (ПБ-4_арм_Теор) і стрічки (ПБ-4_стр_Теор) в координатах « $M-\epsilon \times 10^3$ » для балок серії ПБ-4 і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.3)

Максимальний прогин, згідно з розрахунком $f_{\max}^{th} = 13.95$ мм (в межах граничних нормативних значень) було досягнуто на етапі вичерпання несучої здатності при згинальному моменті $M_d^{th} = 18.29$ кНм з відхиленням від експериментальних результатів в допустимих межах (9 %).

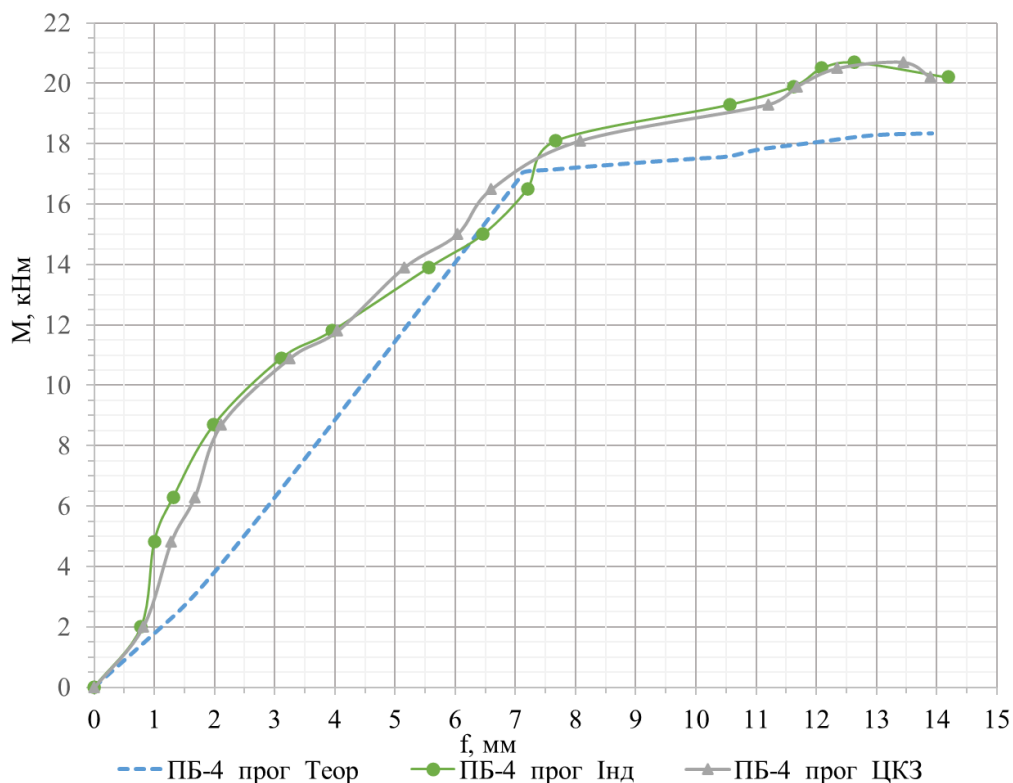


Рис.4.13. Теоретичні графіки прогинів (ПБ-4_prog_Теор) і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.3)

Результати розрахунків несучої здатності і деформативності для балок з максимальним рівнем корозії (серія ПБ-5 з $\varnothing_{\text{факт}}=12$ мм) і їх порівняння з експериментальними даними наведено на рис. 4.14-4.15. Різниця в моменті досягнення деформацій текучості в робочій арматурі становила 5.9%, що є в допустимих межах. При цьому, на рівні вичерпання несучої здатності $M_d^{\text{th}}=15.3$ кНм з відхиленням в межах 9%. Величини деформацій в карбоновій стрічці, згідно з розрахунком становили $\varepsilon_f=4.48 \times 10^{-3}$, див. табл. 4.3, що є на 5.8% вищим за експериментально заміряні значення.

Максимальний теоретичний прогин для серії ПБ-5 становив $=14.8$ мм, що є дещо вище за нормативний і на 4.7% менший за експериментально заміряний індикаторами і на 8.2 %, - за ЦКЗ (див. рис.4.15).

Зведені результати розрахунків несучої здатності і прогинів для балок всіх серій, а також їх порівняння з експериментальними даними наведено в табл. 4.1-4.3 і на рис. 4.16-4.18.

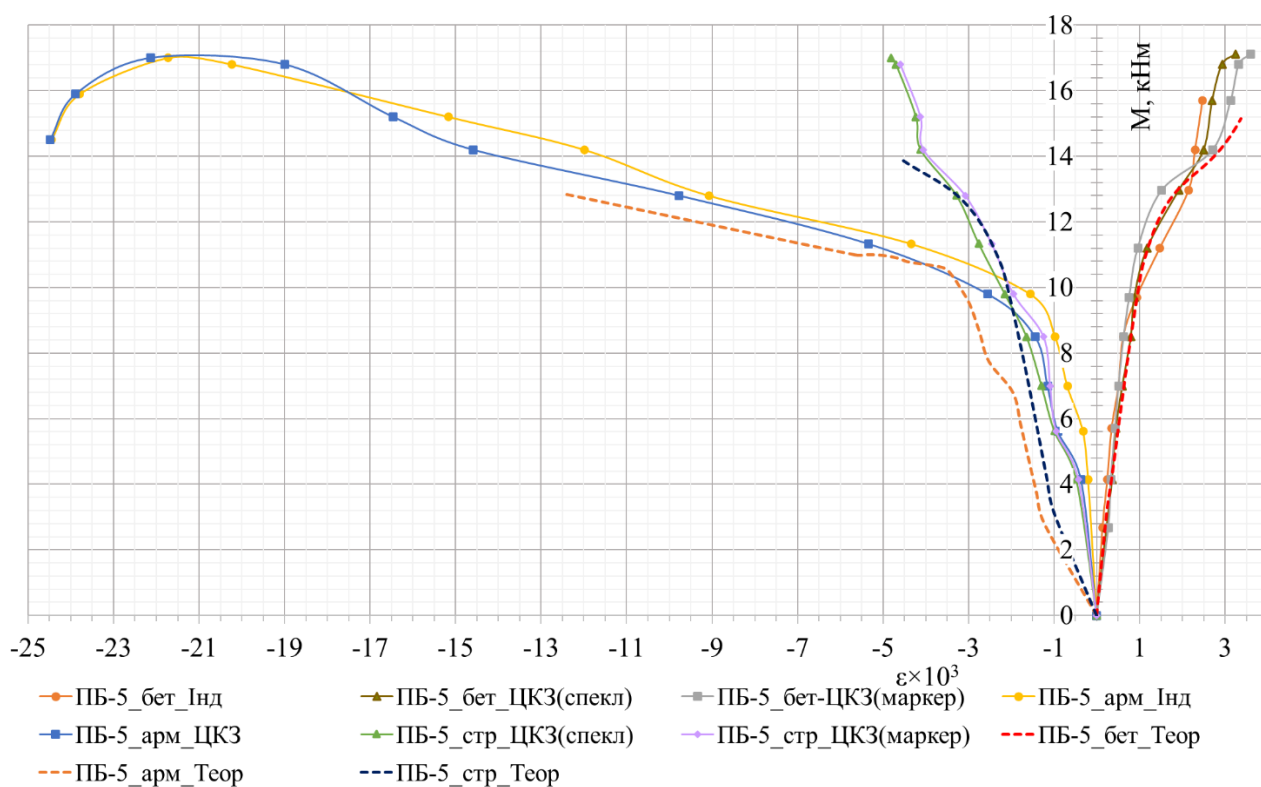


Рис.4.14. Теоретичні графіки деформацій стиснутого бетону (ПБ-5_бет_Теор), розтягнутої арматури (ПБ-5_арм_Теор) і стрічки (ПБ-5_стр_Теор) в координатах « M - $\epsilon \times 10^3$ » для балок серії ПБ-5 і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.3)

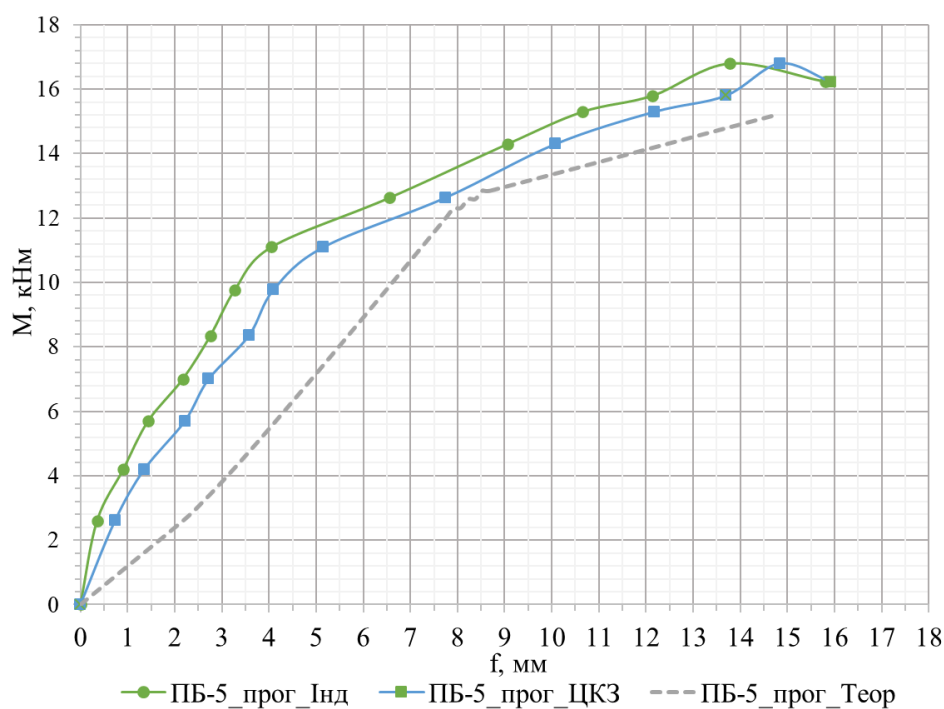


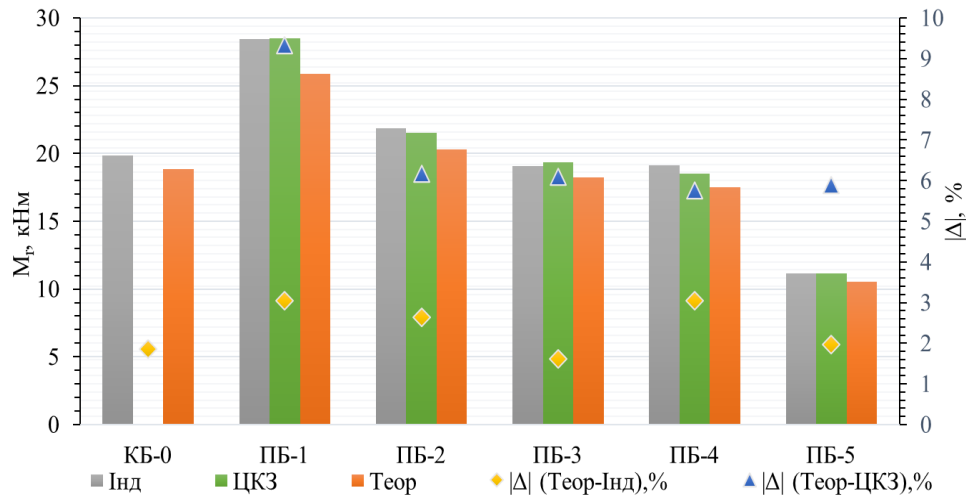
Рис.4.15. Теоретичні графіки прогинів (ПБ-5_прог_Теор) і їх порівняння з експериментальними (див. п.п.3.2.3)

Таблиця 4.1

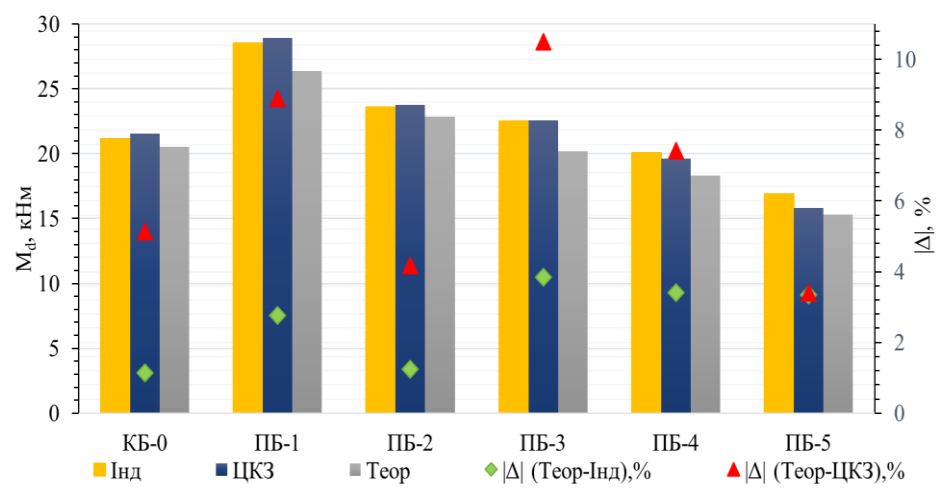
Результати розрахунку несучої здатності і порівняння з експериментальними даними

Шифр серії	$\varnothing_{\text{арм, мм}}$	Текучість основної арматури M_r , кНм					Вичерпання несучої здатності M_d , кНм				
		Інд	ЦКЗ	Теор	Відхилення $\Delta(\text{Теор-Інд}),\%$	Відхилення $\Delta(\text{Теор-ЦКЗ}),\%$	Інд	ЦКЗ	Теор	Відхилення $\Delta(\text{Теор-Інд}),\%*$	Відхилення $\Delta(\text{Теор-ЦКЗ}),\%*$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
КБ-0	20	19.87	–	18.86	+5.55	–	21.16	21.57	20.54	+3.12	+5.14
ПБ-1	20	28.45	28.51	25.85	+9.14	+9.33	28.51	28.91	26.37	+7.51	+8.91
ПБ-2	20→18	21.88	21.53	20.28	+7.89	+6.17	23.62	23.78	22.84	+3.42	+4.17
ПБ-3	20→16	19.09	19.32	18.21	+4.83	+6.1	22.54	22.55	20.18	+10.47	+10.51
ПБ-4	20→14	19.12	18.53	17.52	+9.13	+5.76	20.08	19.65	18.29	+9.27	+7.43
ПБ-5	20→12	11.15	11.15	10.53	+5.92	+5.92	16.87	15.83	15.3	+9.12	+3.41

*Примітка: Інд- експериментальні результати згідно з індикаторами, ЦКЗ-те саме, згідно з ЦКЗ, Теор-теоретичні результати, знак «+» свідчить перевищення експериментальних значень над теоретичними, знак «-»-перевищення теоретичних даних над експериментальними.



а)



б)

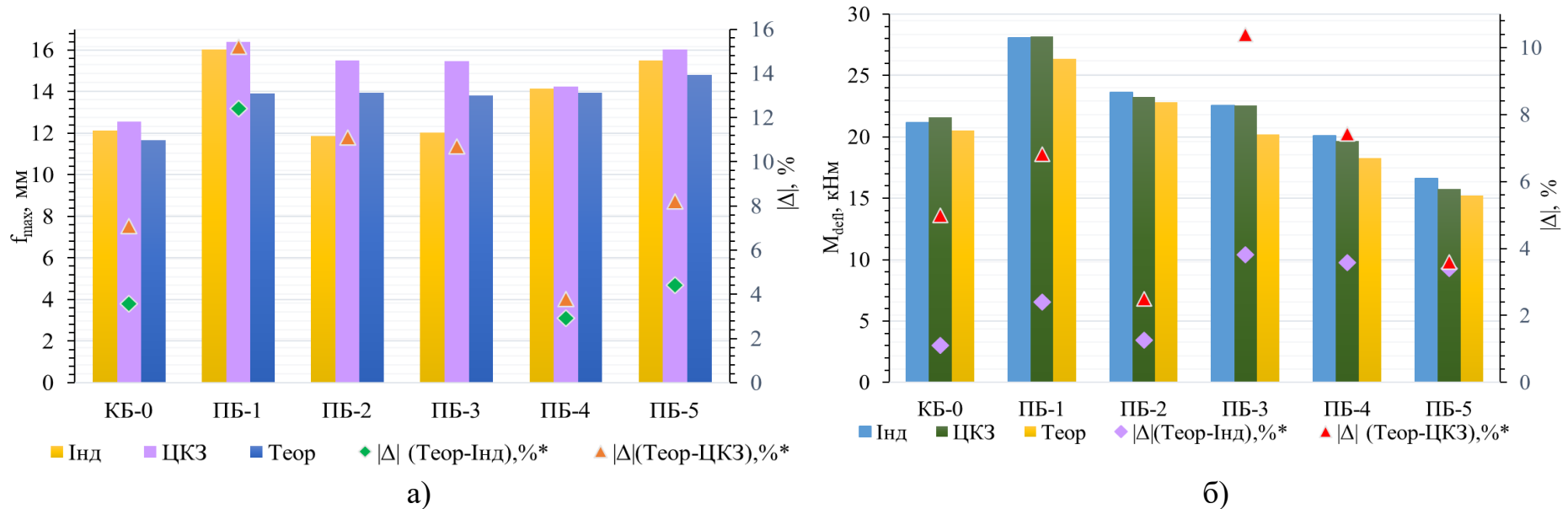
Рис.4.16.Порівняння експериментальних і теоретичних результатів і відхилення ($|\Delta|$, абсолютні): а) M_r , б) M_d

Таблиця 4.2

Результати розрахунку прогинів і порівняння з експериментальними даними

Шифр серії	$\varnothing_{\text{арм, мм}}$	Максимальний прогин f_{max} , мм					Момент що відповідає граничному прогину M_{def} , кНм***				
		Інд	ЦКЗ	Теор	Відхилення Δ (Теор-Інд),%*	Відхилення Δ (Теор-ЦКЗ),%*	Інд	ЦКЗ	Теор	Відхилення Δ (Теор-Інд),%*	Відхилення Δ (Теор-ЦКЗ),%*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
КБ-0	20	12.14	12.57	11.68	+3.93	+7.62	21.16	21.57	20.54	+3.18	+5.14
ПБ-1	20	16.01	16.4	13.9	+13.2	+15.2	28.09	28.17	26.37	+6.52	+6.82
ПБ-2	20→18	11.85**	15.5	13.95	-15.05**	+11.11	23.61**	23.26	22.84	+3.45**	+2.49
ПБ-3	20→16	12.04**	15.48	13.81	-12.81**	+10.71	22.54**	22.54	20.18	+10.42**	+10.41
ПБ-4	20→14	14.14	14.25	13.92	+3.11	+3.81	20.08	19.65	18.29	+9.78	+7.43
ПБ-5	20→12	15.49	16.02	14.8	+4.71	+8.21	16.61	15.74	15.2	+9.31	+3.61

*Примітка: див примітку до табл. 4.1. **Примітка 2: див. табл. 3.4. ***Примітка 3: див. табл. 3.4.

Рис.4.17. Порівняння експериментальних і теоретичних результатів і відхилення ($|\Delta|$, абсолютні): а) f_{max} , б) M_{def}

Таблиця 4.3

Відсоток використання композитної стрічки (згідно з граничними деформаціями)

Шифр серії	$\varnothing_{\text{арм, мм}}$	Експериментальні результати максимальної деформації і відсотку використання стрічки			Теоретичні результати максимальної деформації і відсотку використання стрічки			Відхилення теоретичних результатів від експериментальних, Δ %*
		$\varepsilon_f \times 10^3$	FIB Bulletins [101, 102], %	Виробник Sika [21], %	$\varepsilon_f \times 10^3$	FIB Bulletins [101, 102], %	Виробник Sika [21], %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПБ-1	20	3.79	76	29	3.95	79	31	-4.22
ПБ-2	20→18	3.81	76	29	4.18	84	32	-8.8
ПБ-3	20→16	3.89	78	30	4.42	88	34	-11.9
ПБ-4	20→14	3.96	79	30.5	4.45	89	34	-11
ПБ-5	20→12	4.22	84	32.5	4.48	89.6	34.5	-5.8

*Примітка: знак «-» свідчить перевищення теоретичних даних над експериментальними.

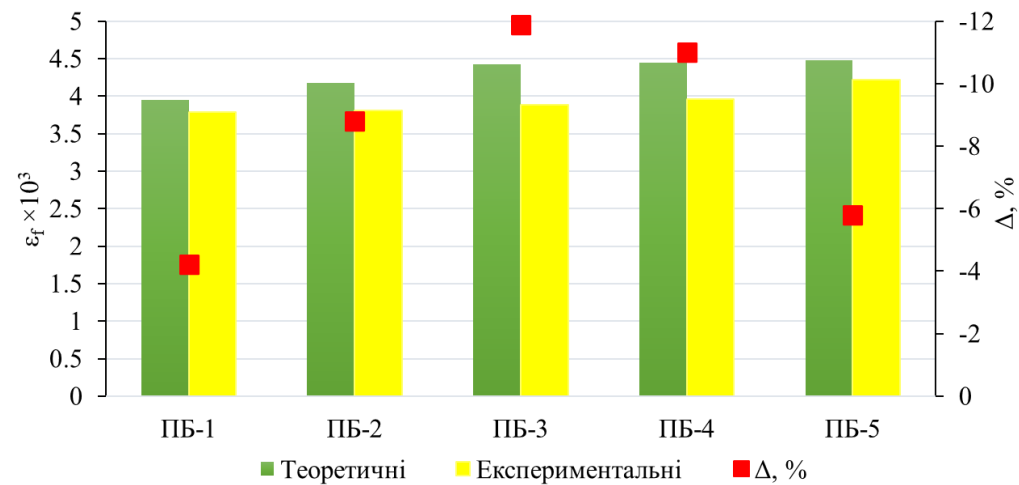


Рис.4.18.Порівняння експериментальних і теоретичних результатів максимальної деформації стрічки і відхилення

4.3. Аналіз впливу підсилення карбоновою стрічкою на процеси тріщиноутворення

На всіх етапах навантаження для непошкоджених експериментальних зразків серій КБ-0 і ПБ-1 (контрольні без підсилення і підсилені стрічкою, відповідно) фіксували появу і розвиток тріщин за допомогою мікроскопа типу МПБ-2М. При цьому, ширину розкриття тріщин вимірювали на рівні розтягнутої арматури (на відстані 20 мм від нижньої грані балки). Отвір в розтягнутому бетоні в зразках серій ПБ-1...ПБ-4 спричинив появу концентраторів напружень в зоні максимального згинального моменту. Відповідно, для цих зразків утворення тріщин мало не типовий характер і в даній роботі не досліджувалось. Зафіксовану в процесі експерименту ширину розкриття тріщин (w_k^{exp}) порівнювали з результатами розрахунків згідно з ДСТУ Б В.2.6-156 [19] (w_k^{th} , див. п.п. 4.1.2). Чисельні значення для зразків серії КБ-0 наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Ширина розкриття тріщин для зразків серії КБ-0 на характерних етапах навантаження

Етап навантаження* M , кНм	Ширина розкриття тріщин для серії КБ-0		
	w_k^{exp} , мм		w_k^{th} , мм
	зразка (КБ-0-1/КБ-0-2)	середнє	
1	2	3	4
2.55	0.05-0.06/ 0.04-0.05	0.05	0.06
7.25	0.06-0.065/ 0.055-0.065	0.06	0.065
9.96	0.06-0.065/ 0.065-0.07	0.065	0.07
11.8	0.07-0.075/ 0.07-0.08	0.074	0.075
13.7	0.08-0.085/ 0.07-0.08	0.079	0.08
19.15	0.1-0.15/ 0.09-0.17	0.13	0.1
21.14	0.29-0.32/ 0.27-0.3	0.29	0.23

Для зразків серії КБ-0 спостерігали утворення тріщин в зоні чистого згину з найбільш інтенсивним їх розвитком і розкриттям біля прикладених сил. Характер утворення і розвитку тріщин для непідсилених зразків КБ-0.1 та КБ-0.2 показано на рис. 4.19. Для обох зразків серії КБ-0 утворення волосяних тріщин зафіксовано при згинальному моменті $M=2.3-2.55$ кНм (що складає 10-12 % від руйнівного

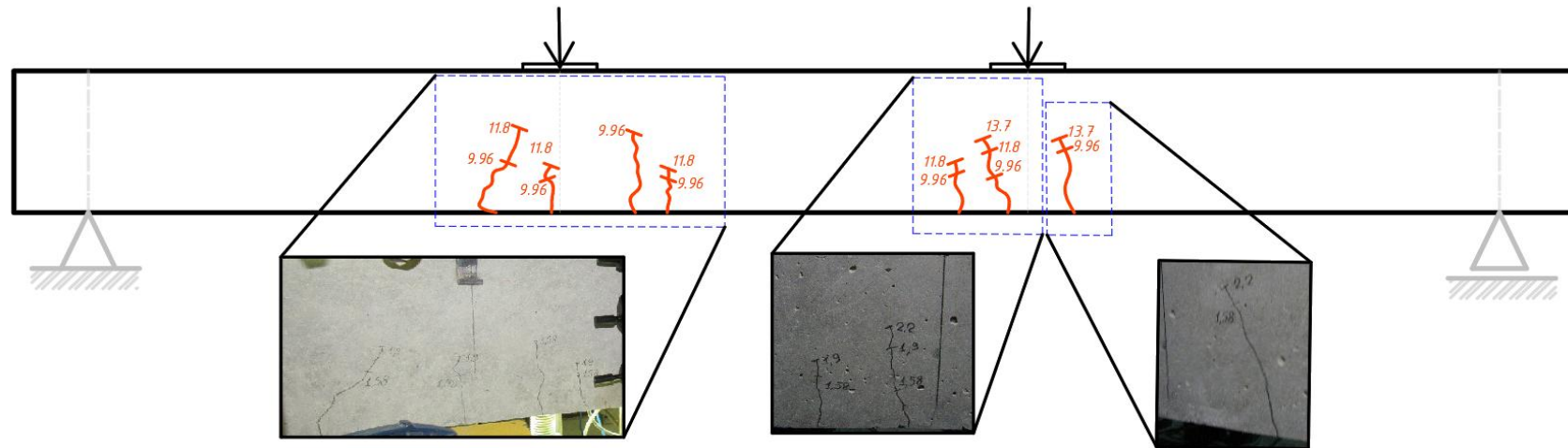
навантаження) з розкриттям в межах $w_k^{\text{exp}}=0.04-0.06$ мм. Теоретичні розрахунки для цього етапу визначають дещо вище значення з допустимим відхиленням ($w_k^{\text{th}}=0.06$ мм). Утворені на першому етапі тріщини поширювались по висоті зразків, що також супроводжувалось поступовим збільшенням їх ширини. Зокрема, при $M=7.25$ кНм (34% від руйнівного навантаження) експериментально заміряні значення $w_k^{\text{exp}}=0.055-0.065$ мм показали хорошу відповідність теоретично отриманим $w_k^{\text{th}}=0.06$ мм. Тріщини продовжували розвиватись по довжині до етапу навантаження що відповідав згинальному моменту $M=13.7$ кНм (65% від руйнівного) із максимальним розкриттям $w_k^{\text{exp}}=0.085$ мм. В подальшому спостерігали інтенсивне розкриття утворених тріщин (без збільшення їх довжини), що на останніх етапах експерименту (при $M=19.15$ кНм, 90% від руйнівного) становило 0.1-0.17 мм. На етапі руйнування ($M=21-21.4$ кНм) розкриття тріщин в дослідних зразках становило близько 0.3 мм, що дещо перевищує теоретичні значення ($w_k^{\text{th}}=0.23$ мм).

Використання методу ЦКЗ також дозволило проаналізувати процеси утворення і розвитку тріщин (див. рис.4.20). Зокрема, типовий розподіл деформацій на бетонній поверхні зразків серії КБ-0 на етапі навантаження, що відповідав формуванню перших волосяних тріщин (при $M=2.5$ кНм, $\approx 11\%$ від руйнівного) наведено на рис. 4.20 (а) (приклад для балки КБ-0-1).

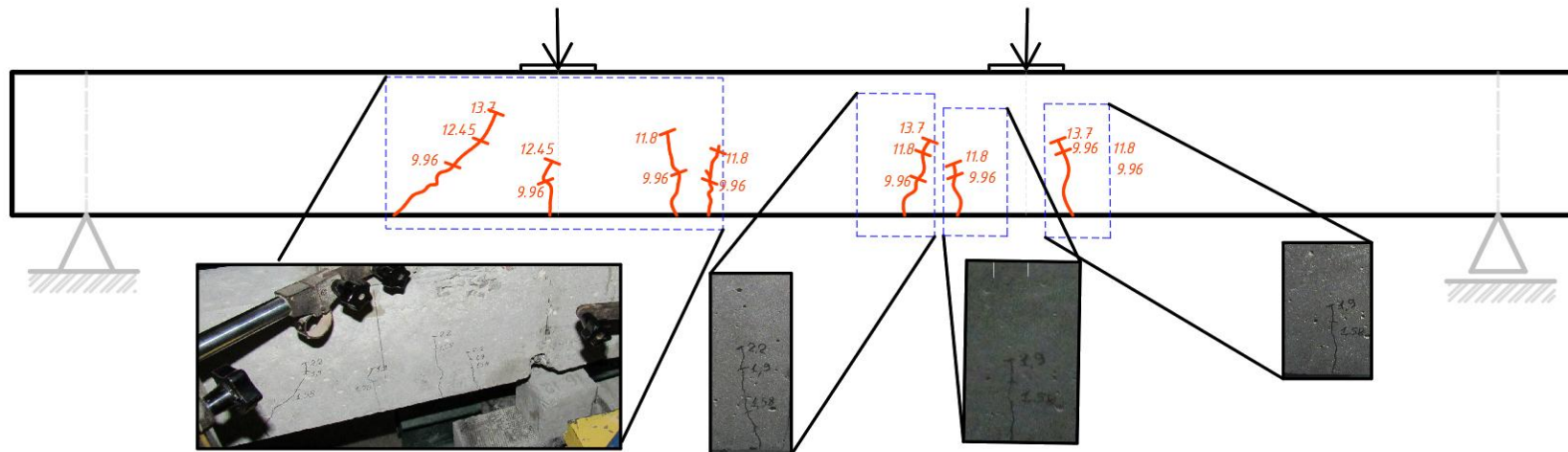
Як видно, про утворення та розвиток тріщин можуть свідчити розриви поля деформацій. Зони, де спостерігаються такі розриви, збільшуються при більш високих рівнях навантаження (див. рис. 4.20 (б)-(в)). Рис. 4.20 (б)-(в) демонструють розподіл деформацій по поверхні бетону, що відповідає подальшому розвитку тріщин (при розкритті тріщини w_k в межах 0.07-0.09 мм).

Загалом, тріщину можна розглядати як певний розрив або порушення суцільності матеріалу, при цьому тріщини виступають концентраторами напружень, які в її вершині можуть розвинути до критично високих значень. Це є причиною подальшого руйнування матеріалу і розвитку тріщини. Важливо враховувати, що наявність зон з дефектами матеріалу, змін геометрії та залишкових

напружень є причиною певних перешкод в розвитку тріщини. Такі фактори, що існують на атомному, мікро- та макрорівні, призводять до того, що для подальшого зростання тріщини потрібно більше енергії. Неоднорідні характеристики бетону, різноманітні включення, розриви та дефекти, таким чином, діють як локальні зони з концентраціями напружень, спричиняючи більші навантаження на область поблизу тріщини. Описані вище тенденції спостерігалися під час експерименту на пізніших етапах навантаження (див. рис. 4.20 (г)-(д)). На більш пізньому етапі розвиток тріщин був більш нестабільним, із дуже інтенсивним їх розкриттям. Важливо відмітити, що метод ЦКЗ дозволяє контролювати та реєструвати розподіл деформації на рівні навантаження, що відповідає руйнуванню балки та максимальному розкриттю тріщини (див. рис. 4.20 (е)). Аналіз процесів тріщиноутворення також наведено в публікації [132].



а)



б)

Рис.4.19. Характер розвитку тріщин в зразках серії КБ-0: а) КБ-0-1, б) КБ-0-2. Числа позначають згинальні моменти (кНм), що відповідали етапам розвитку тріщин

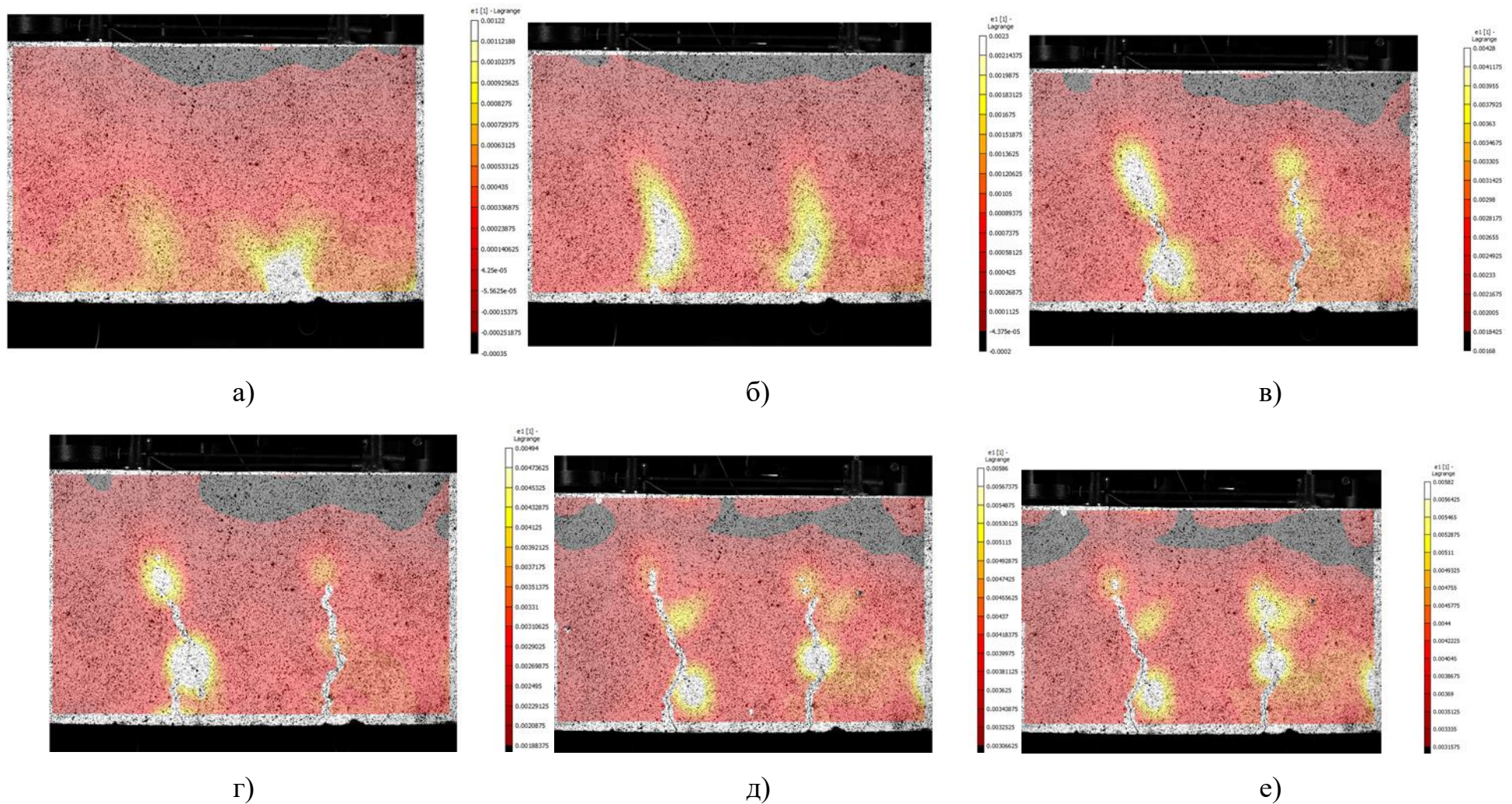


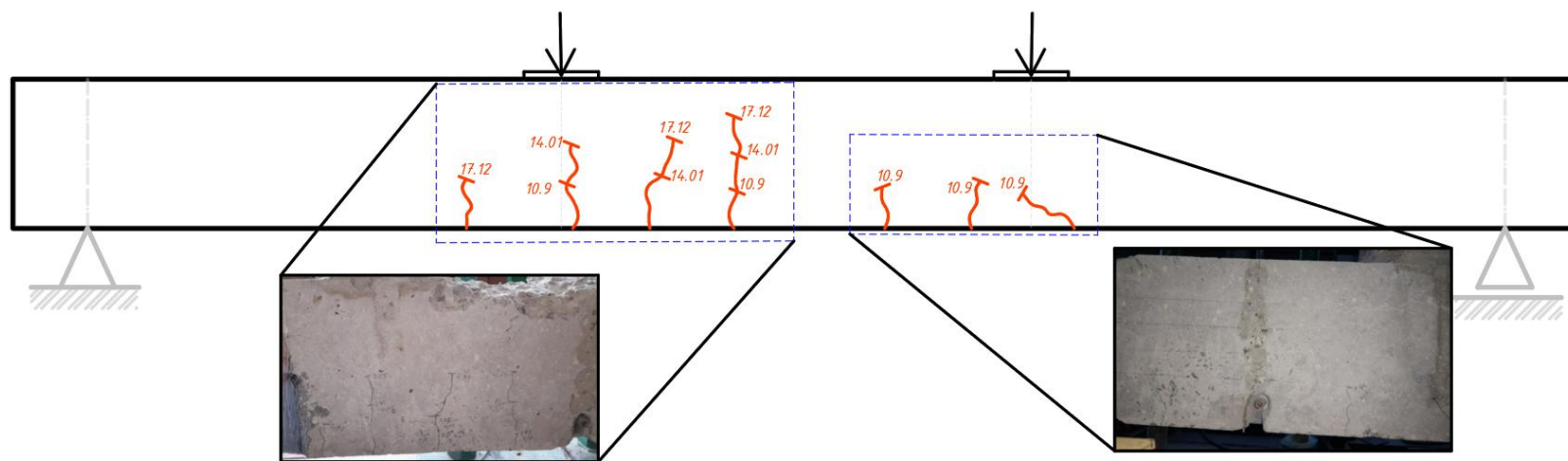
Рис.4.20. Типовий розподіл напружень на різних етапах навантаження і розвитку тріщин в зразках серії КБ-0 (приклад для балки КБ-0-1): а) при $M=2.5$ кНм, (11 % від руйнівного), б) $M=11.8$ кНм (56% від руйнівного), в) $M=13.7$ кНм (65% від руйнівного), г) $M=16.8$ кНм (80 % від руйнівного), д) $M=19.15$ кНм (90% від руйнівного), е) $M=21.14$ кНм

Для зразків серії ПБ-1 перші волосяні тріщини утворились в зонах прикладання сил при навантаженні, що складало 38-40 % від руйнівного ($M=10.9-11.2$ кНм). При досягненні згинального моменту $M=14$ кНм (50% від руйнівного) тріщини розвинулись по висоті балки (до $l=60-70$ мм) з розкриттям w_k^{exp} в межах 0.04-0.055 мм. Збільшення ширини розкриття тріщин і їх довжини загалом продовжувалось до досягнення згинального моменту в 17-17.2 кНм, що складає орієнтовно 60% від руйнівного навантаження. Протягом подальших етапів навантаження, розвиток тріщин призупинився, при цьому максимальне зафіксоване розкриття тріщин не перевищувало значення $w_k^{\text{exp}}=0.065$ мм. Необхідно зазначити, що теоретично визначені значення розкриття тріщин на початкових етапах навантаження (до 50% від руйнівного) були достатньо близькими до експериментальних значень з похибкою в межах 15 %, що є допустимою точністю для інженерних задач. При цьому, на пізніших етапах навантаження було експериментально підтверджено, що застосування підсилення композитними стрічками дозволяє призупинити процеси тріщиноутворення більшою мірою, ніж це було прогнозовано розрахунком. При досягненні згинального моменту Чисельні значення розкриття тріщин згідно з теоретичним розрахунком і заміряні експериментально наведені в табл. 4.5, а характер їх розвитку зображено на рис. 4.21.

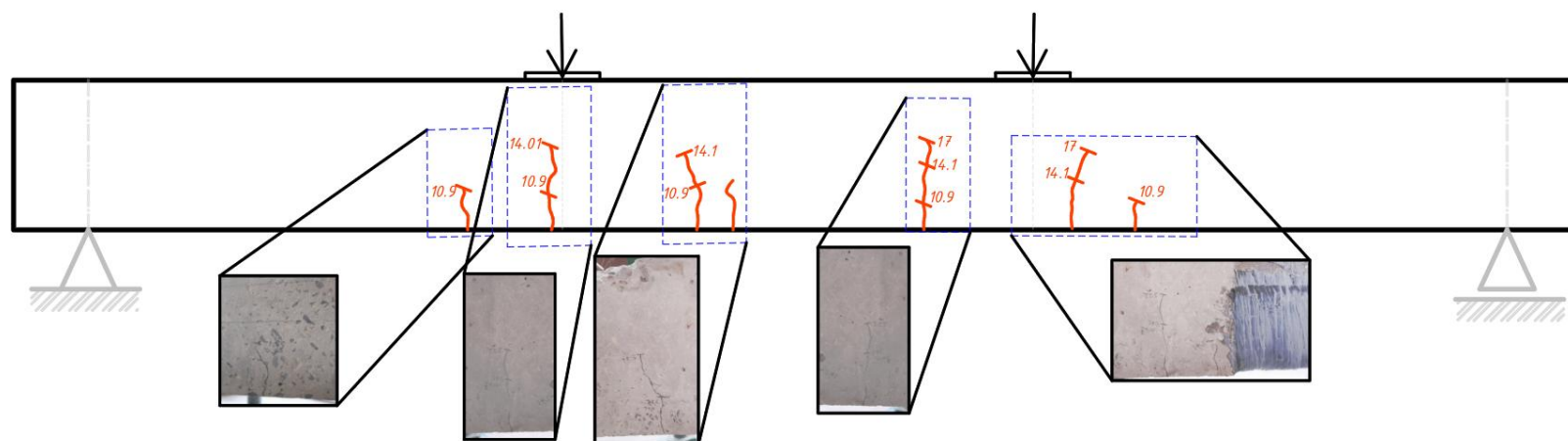
Таблиця 4.5

Ширина розкриття тріщин для зразків серії ПБ-1 на характерних етапах навантаження

Етап навантаження M , кНм*	Ширина розкриття тріщин для серії ПБ-1		
	w_k^{exp} , мм		w_k^{th} , мм
	зразка (ПБ-1-3/ПБ-1-4)	середнє	
1	2	3	4
10.9	0.03-0.04/ 0.04-0.045	0.04	0.05
14	0.04-0.055/ 0.05-0.055	0.05	0.06
17	0.05-0.06/ 0.06-0.065	0.055	0.07
20	0.06-0.065/ 0.06-0.065	0.063	0.08
25	0.06-0.065/ 0.06-0.065	0.063	0.1
28.5	0.065/ 0.065	0.065	0.15



а)



б)

Рис.4.21. Характер розвитку тріщин в зразках серії ПБ-1: а) ПБ-1-3, б) ПБ-1-4. Числа позначають згинальні моменти (кНм), що відповідали етапам розвитку тріщин

На рис. 4.22 зображено розподіл деформацій у зразках серії ПБ-1 під час розвитку тріщин, визначений за допомогою аналізу ЦКЗ. Загальні тенденції тріщиноутворення в цих зразках узгоджуються з контрольними зразками серії КБ-0, проте тріщини в залізобетонних балках, підсилених композитними карбоновими стрічками, мають значно меншу ширину.

Типовий розподіл деформацій на бетонній поверхні зразків серії ПБ-1 на етапі навантаження, що відповідає формуванню перших тріщин (при $M=11$ кНм, $\approx 39\%$ від руйнівного навантаження), демонструє менші розриви поля деформацій у порівнянні з контрольними зразками, -див рис. 4.22(а) для балки ПБ-1-3. Важливо відмітити, що при досягненні 50% від руйнівного навантаження (див рис.4.22 (б)) зони розриву поля деформацій у зразках ПБ-1 залишаються менш вираженими, ніж у зразках КБ-0. Це підтверджує ефективність композитного підсилення у стримуванні розвитку тріщин та забезпеченні рівномірного розподілу напружень у матеріалі. Спостереження на етапі навантаження на рівні 60 % від руйнівного ($M=17$ кНм), також свідчать, що наявність карбонових стрічок зменшує локальні концентрації напружень і ускладнює подальше розкриття тріщин, потребуючи більше енергії для їх прогресування (рис.4.22 (в)).

На пізніших етапах навантаження, що відповідають максимальному розкриттю тріщин та руйнуванню балки (див. рис. 4.22 (г)), спостерігається більш стабільний характер розвитку тріщин у підсилених зразках ПБ-1, на відміну від нестабільного розтріскування у зразках КБ-0. Зменшення ширини тріщин свідчить про підвищену довговічність і покращену стійкість до розтріскування, що досягається за рахунок підсилення карбоновими стрічками.

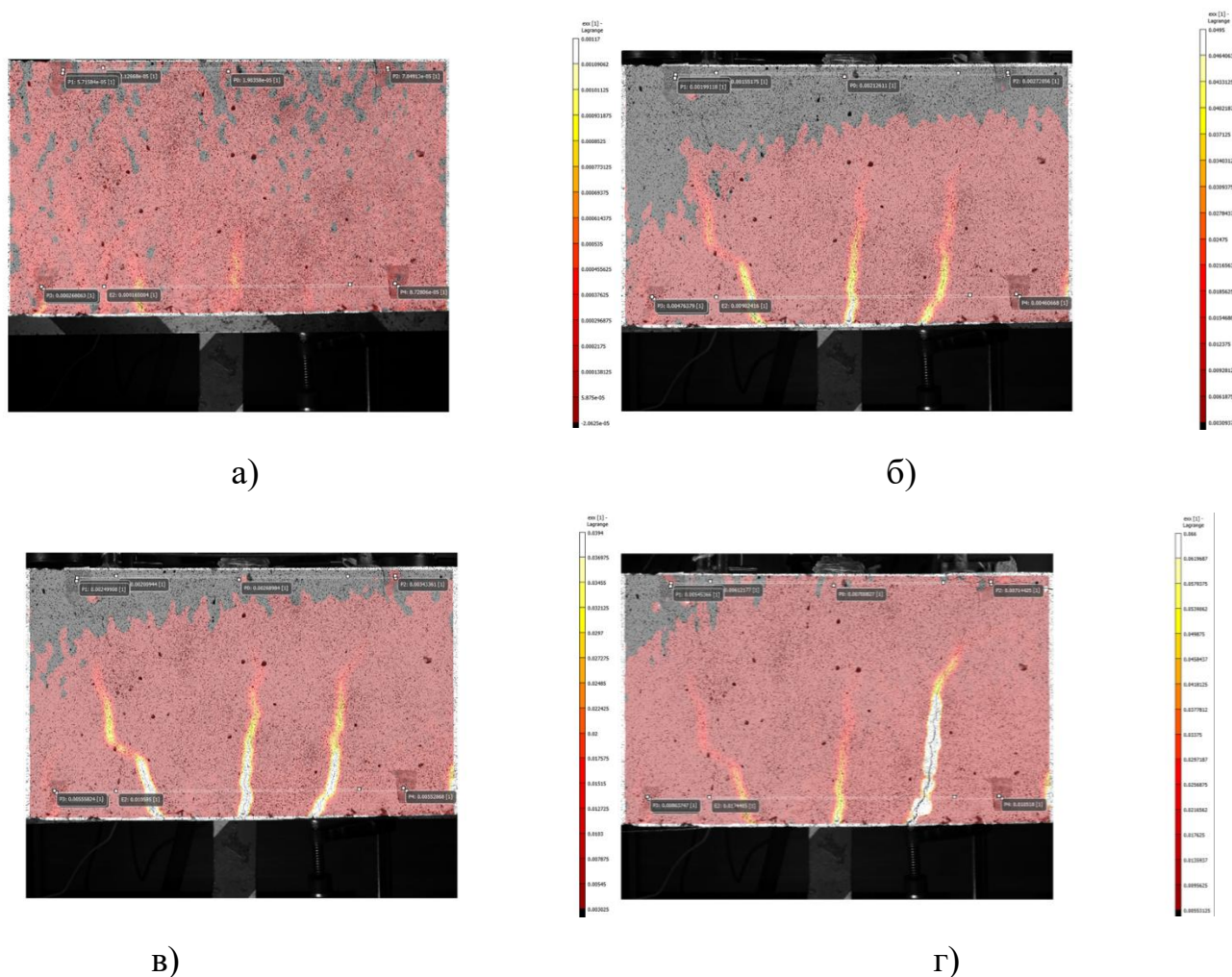


Рис.4.22. Типовий розподіл напружень на різних етапах навантаження і розвитку тріщин в зразках серії ПБ-1 (приклад для балки ПБ-1-3): а) при $M=11$ кНм, (39 % від руйнівного), б) $M=14$ кНм (50% від руйнівного), в) $M=17$ кНм (60% від руйнівного), г) $M=25$ кНм (90 % від руйнівного)

4.4. Висновки до розділу 4

В даному розділі із використанням методик, викладених в нормативних документах, було проведено оцінку несучої здатності і деформативності залізобетонних балок всіх серій. При цьому, при розрахунку було використано значення межі текучості робочої арматури $f_{yk}(x_i)$, згідно з регресійною моделлю у формі рівняння Больцмана (див. Додаток В). Можна зробити наступні висновки:

1. Відхилення теоретичних результатів розрахунку несучої здатності від експериментальних складають від 3 до 15 %, що свідчить про достовірність отриманих даних. При цьому встановлено, що визначені розрахунком значення

моментів досягнення межі текучості арматури і моментів вичерпання несучої здатності для зразків всіх серій були нижчими за експериментальні. Це свідчить про певні запаси, закладені в чинні нормативні документи, що й дозволяє забезпечити надійність і безпеку експлуатації залізобетонних конструкцій.

2. При оцінці деформативності максимальна різниця між теоретичними і експериментальними результатами становила 15%, що є в допустимих межах. Також можна відмітити, що відхилення в прогинах до моменту вичерпання несучої здатності були меншими, тоді як після початку руйнування бетону стиснутої зони експериментально заміряні максимальні прогини перевищували теоретичні.

3. При оцінці деформацій в композитній стрічці підсилення було визначено, що експериментально визначені величини були нижчими за теоретичними з відхиленням від 4 до 12 %.

4. Теоретичні і експериментальні результати дослідження процесів тріщиноутворення були досить близькими, що свідчить про достовірність отриманих результатів. Необхідно відмітити позитивний вплив підсилення композитним матеріалом на тріщиностійкість дослідних зразків.

5. Можна зробити висновок, що експериментальні і теоретичні результати узгоджуються між собою з достатньою точністю, що свідчить про можливість використання запропонованої регресійної моделі при розрахунках за чинними нормативними документами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу щодо застосування карбонових композитних матеріалів для відновлення несучої здатності згинаних залізобетонних конструкцій з пошкодженнями робочої арматури. Проведено детальний теоретичний аналіз і експериментальні дослідження впливу такого типу підсилення на несучу здатність і деформативність залізобетонних балок. Можна виділити наступні загальні висновки, що відображають результати дослідження:

1. В результаті аналізу літературних джерел було встановлено, що, незважаючи на зростаючу практику використання композитних матеріалів для підсилення залізобетонних конструкцій, станом на сьогодні це питання є недостатньо дослідженим, зокрема з використанням новітніх технологій, наприклад цифрової кореляції зображень. Крім того, термічнозміцнена арматура є поширеною в будівельній практиці, однак дослідження корозійних процесів в ній і методів підсилення композитною карбоновою стрічкою потребує детальнішого вивчення.

2. Експериментальним шляхом визначено оптимальні параметри кореляційного спеклу в методі ЦКЗ і вдосконалено методику експериментальних випробувань бетонних призм із застосуванням методу цифрової кореляції зображення та індикаторів. При випробуванні зразків залізобетонних балок було використано 2 різні методи підготовки поверхні (з безпосереднім нанесенням спеклів на поверхню і з застосуванням штучних маркерів), що дозволило провести крос-валідацію результатів, апробувати запропоновані параметри кореляційного спеклу, а також виконати перевірку «нульових» значень для виявлення і усунення можливих похибок. Завдяки цьому було розширено використання методу ЦКЗ для моніторингу технічного стану конструкцій в реальних умовах.

3. Визначено пріоритетні фактори для дослідження, складено оптимальний план і розроблено програму експериментальних досліджень, яка передбачала випробування 8 залізобетонних балок з термічнозміцненою арматурою Ø20 мм,

пошкодженою до ефективного діаметра в діапазоні [18...12 мм], що дозволило змодельовати різний ступінь корозії, а також 4 контрольні зразки без пошкоджень. Зразки, відповідно, було поділено на 6 серій, кожна з яких включала 2 балки з ідентичними параметрами: 1 серія з непошкодженими і непідсиленими балками, 1 серія з непошкодженими і підсиленими карбоновими стрічками балками і 4 серії з балками з різним ступенем пошкодження робочої арматури, підсиленими карбоновими стрічками.

4. Згідно з розробленою методикою виконано підсилення залізобетонних балок карбоною стрічкою Sika Carbodur S512 із забезпеченням необхідного анкерування і уникнення відшарування матеріалу підсилення. В подальшому проведено експериментальні випробування залізобетонних балок для визначення ефективності використання композитних матеріалів при відновленні несучої здатності, при чому програма експериментальних досліджень передбачала використання суб-мікронних індикаторів і методу цифрової кореляції зображень, що дозволило в автоматизованому дистанційному режимі фіксувати деформації бетону, арматури і прогинів включно до етапу вичерпання несучої здатності і фізичного руйнування дослідних зразків. Для всіх експериментальних результатів відхилення в межах одної серії і відхилення між даними, заміряними цифровою кореляцією зображень і суб-мікронними індикаторами не перевищували 5-7 %, що є задовільним для інженерних задач.

5. Експериментальними дослідженнями встановлено, що застосування композитної стрічки SikaCarbodur S512 дозволяє відновити несучу здатність арматури при пошкодженнях до 16 мм (36% зменшення площі поперечного перерізу арматури). Для зразків із початковою корозією (ПБ-2-20% і ПБ-3-36%) несуча здатність досягала 105-112% (в порівнянні з базовим початковим значенням серії КБ-0-100%), а для зразків із значнішими пошкодженнями (14 і 12 мм) – 95% і 79%. У непошкоджених зразках (ПБ-1) зростання несучої здатності склало 35% в порівнянні з контрольною серією (що відповідає 135% якщо як базове значення прийняти 100% несучу здатність КБ-0).

6. Порівняно з непідсиленими балками з еквівалентними пошкодженнями, несуча здатність зросла на 30-110 % залежно від ступеня пошкодження, найбільший ефект зафіксовано при найбільших ступенях пошкодження. Підсилення також зменшило прогини: на 14-32 % залежно від ступеня пошкодження арматури. При цьому на кінцевих етапах навантаження (після руйнування бетону) спостерігалось збільшення максимальних прогинів. Для зразків всіх серій вичерпання несучої здатності відбувалось за ознакою руйнування бетону стиснутої зони. При цьому, оскільки підсилення композитними матеріалами було застосоване в зоні розтягу, то це свідчить, що збільшення несучої здатності було досягнуто за рахунок збільшення площі стиснутої зони балок внаслідок зміщення нейтральної осі і перерозподілу напружень.

7. Згідно з результатами експерименту, згинальний момент, при якому було досягнуто граничний прогин збільшився вдвічі (на 97-129 %) для зразків серій ПБ-3, ПБ-4, ПБ-5 (із середнім і значним ступенем пошкодження, -36%, 51% і 64%) і на 37-45% для ПБ-2 (початковий ступінь корозії- 20% втрати площі поперечного перерізу арматури) в порівнянні з пошкодженими і непідсиленими балками. При цьому, застосування композитної стрічки призвело до збільшення моменту досягнення граничного прогину на 30-32 % (в порівнянні між КБ-0 і ПБ-1). Це свідчить про те, що ефективність підсилення за деформативністю зростає при більших ступенях пошкодження робочої арматури.

8. Відсоток використання композитної стрічки (згідно з максимальними деформаціями) був в близьких межах для всіх серій (76-84 % згідно з FIB Bulletin і 29-32%, згідно з Sika). При цьому найбільший ступінь використання композитної стрічки за граничними деформаціями зафіксовано для балок з більшим ступенем пошкодження, що додатково підтверджує доцільність використання вискоефективних композитних матеріалів для підсилення конструкцій із значними пошкодженнями. Після досягнення межі текучості основної арматури зусилля розтягу сприймалися карбоновою стрічкою, причому композитний матеріал ефективно включався в роботу конструкції без ознак відшарування чи порушення анкерування.

9. Розрахунковим шляхом було визначено теоретичні значення деформацій карбонової стрічки, основної арматури та бетону залізобетонних балок на всіх стадіях роботи під навантаженням до вичерпання несучої здатності. При цьому було використано регресійну модель, що дозволяє враховувати неоднорідні фізико-механічні і міцнісні характеристики термічнозміненої арматури при різних ступенях її пошкодження. Характер приросту деформацій та їх величини задовільно узгоджуються з експериментальними даними. Відхилення теоретичних результатів розрахунку несучої здатності від експериментальних в межах від 3 до 15 %, при чому теоретичні результати були меншими за експериментальні, що свідчить про достовірність отриманих даних. При оцінці деформативності різниця між теоретичними і експериментальними результатами становила від 4 до 15%, що перебуває в допустимих межах. Можна зробити висновок, що експериментальні і теоретичні результати узгоджуються між собою з достатньою точністю, що свідчить про можливість використання запропонованої регресійної моделі при розрахунках за чинними нормативними документами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азізов Т.Н., Кочкар'юв, Д.В. Про нелінійність деформування залізобетонних згинальних елементів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. Вип.42. С.62-75.
2. Азізов Т.Н., Майстренко О.Ф., Ель А.А. Інженерний метод розрахунку підвісних будівель на сейсмічне навантаження. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2024. № 21. С.5-14. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-01)
3. Азізов Т.Н., Перейрас Р. Експериментальні дослідження залізобетонної перехресно-стрижневої системи. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2023. №43. С. 77-84. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i43.9>
4. Бабич Є.М., Бабич В.Є. Удосконалення розрахунку прогинів згинальних залізобетонних елементів з урахуванням тривалості зовнішнього навантаження. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. № 41. С. 87-102. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.010>
5. Бамбура А.М., Дорогова О.В., Петрик Ю.М. Напружено-деформований стан, несуча здатність та момент виникнення тріщин постнапружених згинних залізобетонних елементів за модифікованим деформаційним методом. *Наука та будівництво*, 2020. № 24.2. С. 11-18. <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v24i2.2>
6. Барашиков А.Я., Валовой М.О. Розрахунок підсилених таврових залізобетонних балок за різними методиками. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць*. 2010. № 20. С. 445-451.
7. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. (2019) Дослідження методик моніторингу і моделювання корозійних процесів в залізобетонних елементах. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, (77), 29–37. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-29-37>

8. Бліхарський Я.З. Залишковий ресурс залізобетонних конструкцій з пошкодженнями термічно-зміцненої арматури: автореф. дис. доктора технічних наук, 05.23.01. Одеса, 2021. 46 с.
9. Бліхарський Я.З., Копійка Н.С. Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2019. № 37. С. 316-322. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.300>
10. Бліхарський Я.З., Максименко О.П. Оцінювання міцності і деформативності термозміцненої арматури. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2020. Т. 56, № 6. С. 60-64.
11. Ватуля Г.Л., Лобяк А.В., Черногіль В.Б. Моделювання роботи труобетонних елементів при короткочасному та тривалому навантаженні. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2017. Вип. 170. С. 32-41.
12. Воскобійник О.П. Типологічне порівняння дефектів та пошкоджень залізобетонних, металевих та сталезалізобетонних балкових конструкцій. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2010. Вип. 662: Теорія і практика будівництва. С. 97–103.
13. Гарькава О.А., Павліков А., Атембемах К. Просторове планування для майбутнього України : зб. матеріалів Всеукр. наук.-практ. конф., 25–26 трав. 2023 р. / Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2023. – С. 198–200.
14. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Чинний від 2019-08-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 72 с.
15. Дорогова О., Бамбура А., Сазонова І., Журавський О. Надійність розрахунку гнучких залізобетонних елементів довільно закріплених на опорах за методом «реальної кривизни». *Наука та будівництво*. 2024. Вип. 40, № 2. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-4>

16. Дорофєєв, В. С., Мироненко, І. М., & Пушкар, Н. В. (2022). Вплив складу бетону на формування технологічної пошкодженості і фізико-механічні властивості. Редакційна колегія, 59. С. 30-37. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-4>
17. ДСТУ EN ISO 6892-1:2022 Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN ISO 6892-1:2019, IDT; ISO 6892-1:2019, IDT). Чинний від 2023-12-31. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 75 с.
18. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення Вимоги проектування. Вид. офіц. Чинний від 2007-01-01. Київ: Відкрите акціонерне товариство «Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського» (ВАТ Укрндіпроектстальконструкція ім. В.М.Шимановського), 2007. 15 с.
19. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Чинний від 2011-01-06. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
20. ДСТУ Б.В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Чинний від 2010-01-09. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.
21. ЗНТ–219–2167.13-001. Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій. Вид. офіц. Київ: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2014. 45 с.
22. Іваницький Я.Л., Кунь П.С., Ленковський Т.М., Мольков Ю.В., Штаюра С.Т. Вибір розміру бази вимірювання переміщень для визначення деформацій методом оптико-цифрової кореляції зображень. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2017. Т. 53, Вип. 6. С. 94–98.
23. Іваницький Я.Л., Максименко О.П., Мольков Ю.В., Кунь П.С., Чепіль О.Я. Методика визначення залишкового ресурсу залізобетонних мостових балок

- та розроблення технічних засобів моніторингу деформацій. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2016. Вип. 3. С. 44-49.
24. Іваницький Я.Л., Мольков Ю.В., Кунь П.С., Ленковський Т.М., Войтович М. Визначення локальної деформації біля концентраторів напружень методом цифрової кореляції зображень. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2014. Вип. 4. С. 6-10.
 25. Карпюк І.А., Карпюк В.М., Костюк А.І., Глібоцький Р.В., Постернак О.О. Деформативність та тріщиностійкість пошкоджених балок з базальтопластиковою арматурою, підсилених вуглепластиковим полотном. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7, № 38, ч.І. С. 56-76 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.56-76](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.56-76).
 26. Карпюк І.А., Клименко Є.В., Даниленко Д.С., Карпюк М.В. Порівняльний аналіз несучої здатності дослідних пошкоджених залізобетонних елементів, підсилених металевими обоймами. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8, №39, ч.ІІ. С. 98-115. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.98-115](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.98-115)
 27. Кваша В., Мельник І., Собко Ю., Мурин А., Добрянський Р. Застосування композитів CFRP для підсилення залізобетонних мостів в Україні. In *9th International Scientific Conference "Current issues of civil and environmental engineering"*. Rzeszow, 3-4 September, 2004. С. 221-227.
 28. Клімов Ю. Вплив корозійних пошкоджень на зчеплення арматури періодичного профілю з бетоном. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2021. № 9. С. 4-14. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.4-14>
 29. Клімов Ю. Експериментальні дослідження міцності залізобетонних елементів при дії поперечних сил. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2024. № 14. С. 4-18. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.4-18>
 30. Коваль П.М., Іваницький Я.Л., Ковальчик Я.І., Мольков Ю.В. Дослідження напружено-деформованого стану бетонних зразків методом цифрової

- кореляції зображень. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2013. Вип. 89. С. 185-192.
31. Козак Р., Демчина Б. Дослідження скляних балок на чотирьохточковий згин з використанням методу кореляції цифрових зображень. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2023. № 12. С. 16-26. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.16-26>
 32. Лободанов М.М., Вегера П.І., Бліхарський. З.Я. 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.
 33. Максименко В., Барабаш М., Костира Н., Бармін І. Моделювання динамічних навантажень вибухового типу в задачах дослідження міцності будівельних конструкцій з використанням ПК ЛІРА-САПР. *Наука та будівництво*. 2023. Вип. 38, № 4. С.20-27. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>
 34. Масюк Г.Х., Сірочук В.І. Задачі та методика експериментальних досліджень напружено-деформованого стану приопорних ділянок нерозрізних балок за дії малоциклових знакозмінних навантажень. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2023. № 43. С. 158-165. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i43.18>
 35. Мольков Ю.В. Застосування методу цифрової кореляції зображень до побудови діаграм деформування. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2012. Вип. 6. С. 136-140.
 36. Пашинський В.А., Пашинський М.В., Шамара В.С. Вплив розрахункових параметрів методу граничних станів на надійність сталевих кроквяних балок. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем*. 2022. № 145.
 37. Пічугін С.Ф. Етапи розвитку загальної методики розрахунку будівельних конструкцій: монографія Полтава : АСМІ, 2024. 400 с.

38. Савицький М.В., Нікіфорова Т.Д., Фролов М.О. Напружено-деформований стан сталезалізобетонних конструкцій перекриття на етапі зведення споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3 (003), 2021
39. Савицький М.В., Нікіфорова Т.Д., Шехоркіна С.Є. Методологічні підходи до створення комплексної організаційно-технологічної системи відбудови України за технологіями рециклінгу і розподіленої енергетики. Матеріали науково-практичної конференції «Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України», 13 березня 2024 р., Дніпро / Енерго-інноваційний хаб ПДАБА, 2024. С. 103-106
40. Семко О.В., Воскобійник О.П., Мирошніченко Є.О. Методика експериментальних досліджень збірно-монолітних сталезалізобетонних конструкцій з дефектами. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2010. Вип. 662 : Теорія і практика будівництва. С. 337–344.
41. Семко О.В., Магас Н.М., Гасенко А.В., Філоненко О.І., Авраменко Ю.О. Сталезалізобетонні конструкції при підсиленні пошкоджених виробничих будівель. Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022): зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнар. наук.-техн. конф., 20–22 черв. 2022 р / Полтава : Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2022. С. 46–49.
42. Сінь Я., Горбачевська А., Салійчук Л., Кваша В. Дослідження ефективності реконструкції залізобетонних мостів за тп вип. 56 з підсиленням балок змінною статичної схеми. *Мости та тунелі: теорія, дослідження практика*, 2023. № 24. С. 93-110.
43. Скорук Л., Журавський О. Визначення величини навантаження на захисні споруди цивільного захисту від впливу ударної хвилі згідно ДБН В. 2.2-5: 2023. *Просторовий розвиток*. 2024. № 7. С. 286-296.
44. Фаренюк Г., Белоконь О., Немчинов Ю., Мар'єнков М., Богдан Д., Бабік К., Байтала Х. Оцінка стану будівель і споруд вібродинамічним методом після військових пошкоджень. *Наука та будівництво*. 2022. Вип. 32, № 2. С. 3-18

45. Фаренюк Г., Немчинов Ю., Бамбура А., Шейніч Л., Миколаєць М., Мудрик М. Зміна повітропроникності важкого бетону у часі. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2019. № 102. С. 25-36. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.25-36>
46. Яковенко І.А., Мельничук І.М. Проблематика визначення параметрів деформування залізобетонних конструкцій, посилених у розтягнутій зоні. *Крамаровські читання*, 2023. 485 с.
47. Яровий С.М., Титюк А.О., Титюк А.А., Богаченко С.В. Методика розрахунку однопрогінних рам з урахуванням сумісної роботи колон та форми їх деформування. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. Вип. 2, № 014. С. 108-113. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.108.938>
48. Яцко Ф. В. Практична інженерна методика оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів в процесі проектування. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2014. Вип. № 6. С. 138-146.
49. Abdalla J.A., Mhanna H.H., Hawileh R.A., Sharafi M., Al-Marzouqi A., Al-Teneiji S., Al-Ali K. Shear Strengthening of Reinforced Concrete T-Beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Anchored with CFRP Spikes. *Procedia Structural Integrity*. 2022. no 42. P. 1223-1230. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.156>
50. Abdul Halim N.H.F., C Alih S., Vafaei M. Efficiency of CFRP strips as a substitute for carbon steel stirrups in RC columns. *Materials and Structures*. 2020. Vol.53, no. 5, P. 1-12, <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01566-w>.
51. Adamczak-Bugno A., Lipiec S.; Vavruš M., Koteš P. Non-Destructive Methods and Numerical Analysis Used for Monitoring and Analysis of Fibre Concrete Deformations. *Materials*, 2022, 15(7268). <https://doi.org/10.3390/ma15207268>
52. Adhikary, S. D., Li, B., & Fujikake, K. (2015). Residual resistance of impact-damaged reinforced concrete beams. *Magazine of Concrete Research*, 67(7), 364-378. <https://doi.org/10.1680/macr.14.00312>

53. Ahmad Alyaseen [†],a, Arunava Poddar a, Jassem Alissa b, Hussain Alahmad c, Fadi Almohammed. Behavior of CFRP-strengthened RC beams with web openings in shear zones: Numerical simulation. *Materials Today: Proceedings* 65 (2022) 3229–3239. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.378>
54. Ajibola-Ibrahim, Q. (2023). Investigation of reinforced concrete members with bond deterioration under tensile load. *MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN*, 73(351), e319. <https://doi.org/10.3989/mc.2023.297522>
55. Almeida da Rocha M.M, de Souza A.S.C, de Albuquerque A.T. Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with profiled steel decking. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 194, 107331. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107331>
56. Ansys manual. Explicit Dynamics Analysis Guide. Release 2024. | https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/////Views/Secure/corp/v242/en/exd_ag/exd_ag.html
57. Araújo D. de L., Nunes F. G. T., Filho R.D.T., Araújo M.A.S. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, 2014, 36(3), 389-397. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v36i3.19005>
58. Azizov, T., & Pereiras, R. (2023, November). Influence of cracking on the forces in reinforced concrete slab elements. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2840, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0169454>
59. Bastidas-Arteaga, E., Bressolette, P., Chateauneuf, A., & Sánchez-Silva, M. (2009). Probabilistic lifetime assessment of RC structures under coupled corrosion–fatigue deterioration processes. *Structural safety*, 31(1), 84-96. DOI: 10.1016/j.strusafe.2008.04.001
60. Blikharsky Y, Vashkevych R, Kopiika N, Bobalo T, Blikharsky Z. Calculation residual strength of reinforced concrete beams with damages, which occurred during loading. In: *IOP conference series: materials science and engineering* 2021; 1021(1):012012. doi:10.1088/1757-899x/1021/1/012012.
61. Blikharsky Y., Kopiika N. (2020) Digital image correlation method for analysis of reinforced concrete structures. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil*

- Engineering and Architecture*, (78), 27–33. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2020-78-27-33>
62. Blikharsky Y., Kopiika N. (2021) Methods for determination of deformations with the use of Digital Image Correlation technologies. *Scientific Journal “Theory and Building Practice” Practice*, 3(2), 67-75. <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.02.067>
 63. Blikharsky Y., Kopiika N. (2022) Analysis of the most common damages in reinforced concrete structures. *Scientific Journal “Theory and Building Practice”*, 4(1), 35-42. <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.01.035>
 64. Blikharsky Y., Kopiika N., Khmil R., Selejdak J., Blikharsky Z. (2022) Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress–Strain State of RC Structures. *Applied Sciences*, 12(19), 10157. <https://doi.org/10.3390/app121910157>
 65. Blikharsky Y., Kopiika N., Selejdak J. (2020) Non-uniform corrosion of steel rebar and its influence on reinforced concrete elements' reliability. *Production Engineering Archives*, 26(2), 67-72. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.14>
 66. Blikharsky Y., Kopiika N., Volynets M., Bobalo T. Theoretical analysis of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate. Proceedings of CEE 2019. Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The 8th International scientific conference «Reliability and durability of railway transport engineering structures and buildings» (TransBud 2019) 20–22 November 2019, Kharkiv, Ukraine, 708(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012045>
 67. Blikharsky Y., Selejdak J., Kopiika N. (2021) Corrosion fatigue damages of rebars under loading in time. *Materials*, 14(12), 3416; <https://doi.org/10.3390/ma14123416>
 68. Blikharsky Y., Selejdak J., Kopiika N. (2021) Specifics of Corrosion Processes in Thermally Strengthened Rebar. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00646, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00646>

69. Blikharskyy Y., Selejdak J., Vashkevych R., Kopiika N., Blikharskyy Z. (2023) Strengthening RC eccentrically loaded columns by CFRP at different levels of initial load. *Engineering Structures. Engineering Structures*, 280, 2023 115694. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115694>.
70. Blikharskyy Y., Vashkevych R., Kopiika N., Bobalo T., Blikharskyy Z. (2021) Calculation residual strength of reinforced concrete beams with damages, which occurred during loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1021(1), 012012. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012012>
71. Blikharskyy, Y. Z., Kopiika, N. S. (2020). Influence of steel rebar uniform corrosion on reinforced concrete structures strength. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (79), 34-42. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-34-42>
72. Blikharskyy, Y., Kopiika, N., Khmil, R., & Blikharskyy, Z. (2023, September). Digital Image Correlation Pattern for Concrete Characteristics—Optimal Speckle. In *International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice-Rzeszów* (pp. 22-31). Cham: Springer Nature Switzerland.
73. Blikharskyy, Y., Selejdak, J., & Kopiika, N. (2021). Specifics of corrosion processes in thermally strengthened rebar. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00646, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00646>
74. Bobalo T, Blikharskyy Y, Selejdak J, Kopiika N, Blikharskyy Z. (2023) Concrete Beams Reinforced with High Strength Rebar in Combination with External Steel Tape. *Applied Sciences*. 13(7):4528. <https://doi.org/10.3390/app13074528>
75. Bobalo T., Blikharskyy Y., Kopiika N., Volynets M. Influence of the percentage of reinforcement on the compressive forces loss in pre-stressed RC beams strengthened with a package of steel bars. *Lecture Notes in Civil Engineering, Proceedings of 2nd International scientific conference on EcoComfort and Current issues of civil engineering EcoComfort 100*. Lviv; Ukraine, 16–18 September 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_7

76. Bobalo T., Blikharsky Y., Kopiika N., Volynets M. Serviceability of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate.// In International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice-Rzeszów (September, 2019). Springer, Cham, 2019, P. 25-33. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_4.
77. Bondar, O. V., & Bepalov, K. I. (2023). Automatic monitoring of industrial buildings for the safety of structures, adjacent installations and technological units. Publishing House "Baltija Publishing". <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-86>
78. Bondarenko, V. I., Kovalevska, I. A., Podkopaiev, S. V., Sheka, I. V., & Tsivka, Y. S. (2022, June). Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1049, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
79. Borysiuk O., Karavan V., Sobczak-Piąstka J. (2019). Calculation of the normal section strength, rigidity and crack resistance of beams, strengthened by carbon-fiber materials. In AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC. 2077(1), 020008, doi: 10.1063/1.5091869.
80. Bouyra Q., Blaysat B., Chanal H., Grédiac M. Using laser marking to engrave optimal patterns for in-plane displacement and strain measurement. *Strain*. 2021. e12404.
81. Breccolotti M. On the evaluation of prestress loss in PRC beams by means of dynamic techniques. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2018. Vol. 12. No 1. P. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0237-8>.
82. Cardone D. Fragility curves and loss functions for RC structural components with smooth rebars. Earthquakes and Structures. 2016. Vol.10. No 5. P. 1181-1212. DOI: <https://doi.org/10.12989/eas.2016.10.5.1181>.
83. Chen D.J., Chiang F.P., Tan Y. S., Don H.S. Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method. Applied optics. 1993.Vol. 32. No 11. P.1839-1849.

84. Chinthapalli HK, Chellapandian M, Agarwal A, Prakash S. Retrofitting of fire damaged RC columns. In: 11th international conference on structures in fire (SiF2020), Online, 30 November–2 December 2020. Brisbane, QLD Australia: The University of Queensland; 2020. p. 363–73. doi:10.14264/8b1eb4f.
85. Chiu C.K., Sung, H.F., Chi K.N., Hsiao F.P. Experimental quantification on the residual seismic capacity of damaged RC column members. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2019. Vol.13, No 1. P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0338-z>.
86. Christensen C. O., Schmidt J. W., Halding P. S., Kapoor M., Goltermann P. Digital Image Correlation for Evaluation of Cracks in Reinforced Concrete Bridge Slabs // *Infrastructures*. 2021. Vol. 6. No 7. P.99.
87. Cintrón R., Saouma V. Strain measurements with the digital image correlation system Vic-2D. Center for Fast Hybrid Testing Boulder, Colorado. 2008. 23 p.
88. Cruz H., Aval S.F., Dhawan K., Pourhomayoun M., Rodriguez-Nikl T., Mazari M. California State University Los Angeles. |*Conference: 2019 International Conference on Image Processing, Computer Vision, & Pattern Recognition*, Las Vegas, Nevada, US, July 2019. P.151-156.
89. Cui, F., Song, L., Wang, X., Li, M., Hu, P., Deng, S., ... & Li, H. (2022). Seismic Fragility Analysis of the Aging RC Columns under the Combined Action of Freeze–Thaw Cycles and Chloride-Induced Corrosion. *Buildings*, 12(12), 2223. DOI: 10.3390/buildings12122223
90. Dalyan İ, Doran B. An investigation on the flexural behaviour of RC beams wrapped with CFRP. *Int Adv Res Eng J* 2021;5(1):97–105. <https://doi.org/10.35860/iarej.775557>.
91. Del Rey Castillo, E., Griffith, M., & Ingham, J. (2016, December). Force-based model for straight FRP anchors exhibiting fibre rupture failure mode. In *Proceedings of The 8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering*, Hong Kong.
92. del Rey Castillo, E., Kanitkar, R., Smith, S. T., Griffith, M. C., & Ingham, J. M. (2019). Design approach for FRP spike anchors in FRP-strengthened RC

- structures. *Composite Structures*, 214, 23-33.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.100>
93. DesignXplorer User's Guide. Release 2021 R2. Southpointe July 2021, 2600 Ansys Drive Canonsburg, PA 15317 ANSYS, Inc. and <http://www.ansys.com> registered ISO 9001:2015
 94. DIC Algorithms. URL: <http://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms> (дата звернення: 02.03.2023)
 95. Dizaji M. S., Harris D. K., Kassner B., Hill J. C. Full-field non-destructive image-based diagnostics of a structure using 3D digital image correlation and laser scanner techniques. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2021. Vol. 11. No 5. P. 1415-1428.
 96. Dong J, Wang Q, He D, Guan Z. CFRP sheets for flexural strengthening of RC beams. In: 2011 international conference on multimedia technology 26–28 July 2011. IEEE; 2011. p. 1000–3. <https://doi.org/10.1109/ICMT.2011.6003160>.
 97. Dung D.T.M.; Khai L.T.Q. Nonlinear analysis of multi-layer steel fiber reinforced concrete beams. *Journal of Construction*, 2021, 4, 58-63
 98. Džidić S., Mahmutović A. Analysis of the possibility for retrofit of rc beams by traditional and modern methods. The 18th International Symposium of MASE. Ohrid, Republic of North Macedonia. October 2019, 270-279.
 99. Eklou R. J., Yani M. B., Saifullah H. A., Sangadji S., Kristiawan S. A. Experimental study: Shear behaviour of reinforced concrete beams using steel plate strips as shear reinforcement. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, May, 1144(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1144/1/012040>
 100. Farid Abed *, Mustafa Al-Mimar , Sara Ahmed. Performance of BFRP RC beams using high strength concrete. *Composites Part C: Open Access* 4 (2021) 100107. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100107>
 101. FIB Bulletin No. 56. Model Code 2010; 2:312 p.

102. fib Task Group 5.1. Fib Bulletin 90: Externally Applied FRP Reinforcement for Concrete Structures; Task Group 5.1 Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for concrete structures: Lausanne, Switzerland, 2019
103. Fomin, S., Butenko, S., Plakhotnikova, I., & Koliesnikov, S. (2023, May). Mathematical theory of stress-strain diagram for concrete under fire conditions and high temperatures. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2684, No. 1). AIP Publishing.
104. Gamot J., Lasserre T., Richard L., Neggers J., Swiergiel N., Hild, F. Calibrating thermoelastic stress analysis with integrated digital image correlation: Application to fatigue cracks. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2019. Vol. 54. No 5-6. P. 320-330.
105. Gao L., Zhang J., Yu L. Evaluation on Reinforcement Effect of Steel-UHPC Composite Deck with Steel Strip. *J. Highw. Transp. Res. Dev.*, 2022, 39, 74–84. <https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000823>
106. Gideon D. A., Alagusundaramoorthy P. (2018). Flexural retrofit of RC beams using CFRP laminates. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 431(7), 072006). doi:10.1088/1757-899X/431/7/072006
107. GOM Correlate Pro. Electronic Manual. GOM. URL: <https://www.gom.com/en/products/gom-suite/gom-correlate-pro>
108. Gonzáles G. L. G., González J. A. O., Castro J. T. P., Freire J. L. F. Detecting fatigue crack closure and crack growth delays after an overload using DIC measurements. In *Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution*. Springer, Cham. 2018. Vol. 7 P. 57-65.
109. Gorjup D., Slavič J., Babnik A., Boltežar M. Still-camera multiview Spectral Optical Flow Imaging for 3D operating-deflection-shape identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 152. No 107456.
110. Gualtieri S. Novel technique for DIC speckle pattern optimization and generation. ING IV : Milan, Italy. Scuola di Ingegneria Industriale. 2012. 127 p

111. Halim NHFA, Alih SC, Vafaei M. Seismic behavior of RC columns internally confined by CFRP strips. *Adv Concr Constr* 2021;12(3):217–25. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.3.217>
112. Han, S. W., Jang, J., & Kim, T. (2022). Effect of HPFRCC on Cyclic Behavior of Diagonally Reinforced Coupling Beams. In *Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020) Volume 3: Service Life Extension of Existing Structures 3* (pp. 259-266). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-76465-4_23
113. Haya H. Mhanna, Rami A. Hawileh, Ahmad Al Rashed, Jamal A. Abdalla. Performance of RC beams externally strengthened with hybrid CFRP and PETFRP laminates. *Procedia Structural Integrity* 42 (2022) 1190–1197. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.152
114. Hibner D. R. Residual axial capacity of fire exposed reinforced concrete columns: thesis of dissertation of Master of Science in Civil Engineering. Michigan State University. 2017. 134 p.
115. Hu W., Sheng Z., Yan K., Miao H., Fu Y. A New Pattern Quality Assessment Criterion and Defocusing Degree Determination of Laser Speckle Correlation Method. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No 14. P. 4728.
116. Huang, Z., Deng, W., Li, R., Chen, J., Sui, L., Zhou, Y., Zhao D., Yang L., Ye, J. (2022). Multi-impact performance of prestressed CFRP-strengthened RC beams using H-typed end anchors. *Marine Structures*, 85, 103264. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103264>
117. Islam, S. M. Z., Ahmed, B., Deb, J., Shamim, S. S., Himel, O. F., Nisat, M. N. H., & Rahman, M. M. Investigation on Flexural Behavior of Pre-cracked RC Beams Strengthened using CFRP. *Proceedings of International Conference on Planning, Architecture & Civil Engineering*, 09 – 11 September 2021, Rajshahi University of Engineering & Technology, Rajshahi, Bangladesh
118. Ivanytskyi, Y. L., Blikharskyi, Z. Y., Maksymenko, O. P., Panchenko, O. V., & Blikharskyi, Y. Z. (2024). Development of the Methodology for Monitoring the Technical State of Bridge Structures and Establishment of Safe Operating Period.

- Materials Science, 2024, 59(6), pp. 711–719. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00832-4>
119. Jahami, A., Temsah, Y., Khatib, J., Baalbaki, O., Kenai, S. The behavior of CFRP strengthened RC beams subjected to blast loading. Magazine of Civil Engineering. 2021. 103(3). Article No. 10309. DOI: 10.34910/MCE.103.9
 120. Jailin C., Buljac A., Bouterf A., Hild F., Roux S. Projection-based measurement and identification. In Advancements in Optical Methods & Digital Image Correlation in Experimental Mechanics. Springer, Cham. 2020. Vol. 3. P. 125-129.
 121. Jincheng Yang a, Morgan Johansson a,b, Mohammad Al-Emrani a, Reza Haghani. Innovative flexural strengthening of RC beams using self-anchored prestressed CFRP plates: Experimental and numerical investigations. Engineering Structures 243 (2021) 112687. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112687>
 122. Jing ZN, Liu RG, Xie GH, Liu D. Shear strengthening of deep T-section RC beams with CFRP bars. Materials 2021;14(20):6103. <https://doi.org/10.3390/ma14206103>.
 123. Jonczyk D. Deflection estimation of glued laminated timber beams reinforced with CFRP fibre composites. Constr Optim Energy Potent 2020;(2):127–34. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2020.2.15>
 124. Kantarci M. · M.M. Maras1 · Y. Ayaz1. Experimental Performance of RC Beams Strengthened with Aluminum Honeycomb Sandwich Composites and CFRP U-Jackets. Experimental Techniques. <https://doi.org/10.1007/s40799-022-00589-y>
 125. Karpiuk I., Danilenko D., Karpiuk V., Danilenko A., Lyashenko T. Bearing capacity of damaged reinforced concrete beams strengthened with metal casing. Acta Polytechnica, 2021, 61(6):703–721. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0703>
 126. Karpiuk V., Tselikova A., Khudobych A., Kostyuk A., Karpiuk I. (2020). Study of strength, deformability property and crack resistance of beams with BFRP.

- Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7-106), 42-53. doi: 10.15587/1729-4061.2020.209378
127. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 960(2), 022046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/2/022046>
 128. Klymenko, Y., Grynyova, I., Maksiuta, O., & Kos, Z. (2023, September). Principles of Modeling the Work of Damaged Columns Made of Compressed Reinforced Concrete. In International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów (pp. 178-186). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_19
 129. Klymenko, Y., Polianskyi, K., Grynyova, I., & Borzovič, V. (2024, August). Influence of Damage in the Compressed Zone of Concrete on the Bearing Capacity Along Inclined Sections and Crack Formation Characteristics. In International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering (pp. 225-234). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_20
 130. Kochkarev, D., Azizov, T., & Galinska, T. (2024, August). Calculation of Buildings and Structures for Air Blasts Using Explosion Accelerograms. In International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering (pp. 245-256). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_22
 131. Kolokhov, V., Savytskyi, M., & Sopilniak, A. (2021). Stress-strain state of the local area in the building element with structural defect. Journal of Engineering Sciences, (1), 111-116. [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2021.28\(1\).11](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2021.28(1).11)
 132. Kopiika N., Blikharsky Y., Sobko Y., Khmil R., Blikharsky Z. (2025) Impact of CFRP-strengthening on Crack Formation in RC Structures. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. (1499), No 01202. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012021>

133. Kopiika N., Blikharsky, Y. (2023). Perspectives and specific features of the use of composite materials for strengthening of damaged reinforced concrete structures. December 2023, *Scientific Journal "Theory and Building Practice"*, (2), 27-34. <http://dx.doi.org/10.23939/jtbp2023.02.027>
134. Kopiika, N., Blikharsky, Y. (2022). Effectiveness of strengthening of reinforced concrete beams with the use of composite materials. *Scientific Journal "Theory and Building Practice"*, 4(2), 7-16. <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.02.007> .
135. Kopiika, N., Blikharsky, Y. (2024) Digital image correlation for assessment of bridges' technical state and remaining resource. *Structural Control and Health Monitoring*, 2024(1), 1763285. <http://dx.doi.org/10.1155/2024/1763285>
136. Kopiika, N., Blikharsky, Y., Khmil, R., Blikharsky, Z. (2025). Probabilistic assessment of RC beams with corroded thermally strengthened reinforcement. In *Structures*, 77, 109104. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109104>
137. Kopiika, N., Blikharsky, Y., Khmil, R., Tereshko, A. (2024, August). Design of Experiment for Facilitating Effective Research Program Development. In *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering*, pp. 266-280. Cham: Springer Nature Switzerland. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_24
138. Kopiika, N., Blikharsky, Y., Selejdak, J., Khmil, R., Blikharsky, Z. (2025). Reliability-based analysis and residual life forecasting for corrosion-affected RC structures. *In Structures*, 76, 108965. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108965>
139. Kopiika, N., Blikharsky, Y., Selejdak, J., Khmil, R., Blikharsky, Z., Katunsky, D. (2024). CFRP Materials for Restoration of the Bearing Capacity of RC Beams With Damaged Rebar. *Journal of Engineering*, 2024(1), 4915391. <http://dx.doi.org/10.1155/2024/4915391>
140. Kopiika, N., Klym, A., Blikharsky, Y., Katunský, D., Popovych, V. Blikharsky, Z. (2024) Evaluation of the stress-strain state of the RC beam with the use of DIC. *Production Engineering Archives*, Sciendo, 30(4), 463-476. <https://doi.org/10.30657/pea.2024.30.44>

141. Kopiika, N., Selejdak, J., Blikharskyy, Y. (2022). Specifics of physico-mechanical characteristics of thermally-hardened rebar. *Production Engineering Archives*, 28(1), 73-81. <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.09>
142. Kopiika N., Vegera, P., Vashkevych, R., Blikharskyy, Z. (2021) Stress-strain state of damaged reinforced concrete bended elements at operational load level. *Production Engineering Archives*, 27(4), 242-247. <https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.32>
143. Korsun, V. I., Morozov, V. I., Tamrazyan, A. G., & Alekseytsev, A. V. (2023). Nonlinear Deformation Model for Analysis of Temperature Effects on Reinforced Concrete Beam Elements. *Buildings*, 13(11), 2734.
144. Kos Z., Klymenko Y., Karpiuk I., Grynyova I. Bearing Capacity near Support Areas of Continuous Reinforced Concrete Beams and High Grillages. *Appl. Sci.*, 2022, 12(685). <https://doi.org/10.3390/app12020685>.
145. Kos Z., Klymenko Y., Polianskyi K., Crnoja A. Research of the Residual Bearing Capacity and the Work of Damaged Reinforced Concrete Beams' Inclined Sections. *Technical Journal*, 2020, 14 (4), 466-472. <https://doi.org/10.31803/tg-20191125075359>
146. Koteš P., Kotula P., Odrobiňák J., Prokop J. Diagnostics and Evaluation of Two Atypical Girder Bridges on Railway Line. *Key Engineering Materials*, August 2022. <https://doi.org/10.4028/p-i418x0>
147. Kramarchuk A., Ilnytskyy B., Bobalo T., Lytvyniak O. (2021). A study of bearing capacity of reinforced masonry beams with GFRP reinforcement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1021(1), 012018. doi:10.1088/1757-899X/1021/1/012018
148. Kramarchuk A., Ilnytskyy, B., Kopyika, N. Ensuring the Load-Bearing Capacity of Monolithic Reinforced Concrete Slab Damaged by Cracks in the Compressed Zone. In: Blikharskyy, Z. (eds) *Proceedings of EcoComfort 2022. EcoComfort 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2023, 290, 217-229. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_21

149. Kumar, R., & Gardoni, P. (2013). Stochastic modeling of deterioration in buildings and civil infrastructure. In *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems* (pp. 410-434). Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering 2013, Pages 410-434. <https://doi.org/10.1533/9780857098986.3.410>
150. Li W., Huang Y., Jiang Y., Shi T., Xing F. Application of DIC Technology to Shear Crack Measurement of Concrete Beam. *Advances in 3D Image and Graphics Representation, Analysis, Computing and Information Technology: Algorithms and Applications, Proceedings of IC3DIT 2019*. 2020. Vol. 2, No 180, P. 339.
151. Liu L., Wang L.F., Xiao, Z.W. Flexural bearing capacity of RC hollow slab beam strengthened by steel plates of different thicknesses. *Int. J. Struct. Integr.*, 2021, 12, 613–628. <https://doi.org/10.1108/ijsi-04-2021-0041>
152. Lu Y.Y., Zhu T., Li S., Zhang H.J. Numerical analysis of load bearing capacity for RC two-way slab strengthened with well-shaped CFRP—Steel strips. *J. Basic Sci. Eng.*, 2018, 26, 337–345.
153. Maazoun, A., Matthys, S., & Vantomme, J. (2017). Literature review on blast protection by externally bonded FRP reinforcement. In *COST TU1207 End-of-Action Conference*. COST TU1207.
154. Manibalan P., Abirami G., Baskar R., Pannirselvam N. Ductile behavior of reinforced concrete beam incorporated with basalt fiber. *Innovative Infrastructure Solutions* (2023) 8:65, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01033-9>
155. Mathieu F., Hild, F. 2D and 3D Analyses of Cracks Via DIC. *In Fracture and Fatigue*. Springer, Cham. 2014. Vol. 7. P. 73-77.
156. Matthews, B., Palermo, A., & Scott, A. (2023). Overview of the cyclic response of reinforced concrete members subjected to artificial chloride-induced corrosion. *Structural Concrete*, 24(1), 100-114. DOI: 10.1002/suco.202200365
157. Medina, P. A., & González, J. L. (2022). Reinforced concrete long-term deterioration prediction for the implementation of a Bridge Management System. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1265-1271. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.033

158. Meng S., Li J., Liu Z., Wang W., Niu Y., Ouyang, X. (2021). Study of Flexural and Crack Propagation Behavior of Layered Fiber-Reinforced Cementitious Mortar Using the Digital Image Correlation (DIC) Technique. *Materials*, 2021. Vol. 14. No 16. P. 4700.
159. Menz N., Gerasimidis S., Civjan S., Czach J., Rigney J. Review of Post-Fire Inspection Procedures for Concrete Tunnels. Transportation Research Record. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981211006732>.
160. Mhanna, H. H., Hawileh, R. A., & Abdalla, J. A. (2022). Effect of FRP Anchor Inclination Angle on Shear Strengthening of Reinforced Concrete T-beams. In 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering: Proceedings of CICE 2020/2021 10 (pp. 2169-2179). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88166-5_187
161. Mhanna, H. H., Hawileh, R. A., Abdalla, J. A., Salama, A. S. D., and Alkhrdaji, T. 2021. Shear Strengthening of Reinforced Concrete T-Beams with Anchored CFRP Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 25(4), 04021030.
162. Mohammad M.J., Ogihara Sh., Vinogradov V. Application of DIC to deformation measurement around damages in CFRP cross-ply laminates. *Mechanical Engineering Journal*, 2019, Vol. 6, No 3. P. 1-10.
163. Murad Y. An experimental study on flexural strengthening of RC beams using CFRP sheets. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4) (2018) 2075-2080. doi: 10.14419/ijet.v7i4.16546
164. Murad Y. The Influence of CFRP Orientation Angle on the Shear Strength of RC Beams, *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2018, Volume 12, 269-281, DOI: 10.2174/1874836801812010269
165. Naser M.Z., Hawileh R.A., Abdalla J.A. (2018). "State-of-the-Art Review on the use of Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Constructions." *Engineering Structures*. Vol. 198, 109542. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109542>.

166. Naser, M.Z.; Hawileh, R.A.; Abdalla, J.A. Modeling Strategies of Finite Element Simulation of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP: A Review. *J. Compos. Sci.* 2021, 5, 19. <https://doi.org/10.3390/jcs5010019>
167. Nemchynov, I. I., Marienkov, N. H., Kaliukh, I. I., Babik, K. M., & Dyrda, V. I. (2019). Захист житлових будинків від сейсмічних навантажень та динамічних впливів залізничного транспорту. *Наука та будівництво*, 20(2), 19-30.
168. Niezrecki C., Baqersad J., Sabato A. Digital Image Correlation Techniques for Non-Destructive Evaluation and Structural Health Monitoring.// *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation*. 2018. P. 46.
169. Niu Y., Wei J., Jiao C. Crack propagation behavior of ultra-high-performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid steel fibers under flexural loading. *Constr. Build. Mater.* 2021. Vol. 294, P.123510–123523.
170. Pan K., Rena C. Y., Ruiz G., Zhang X., Wu Z., De La Rosa Á. The propagation speed of multiple dynamic cracks in fiber-reinforced cement-based composites measured using DIC. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 122, P.104140.
171. Pang, M.; Shi, S.; Hu, H.; Lou, T. Flexural Behavior of Two-Span Continuous CFRP RC Beams. *Materials* 2021, 14, 6746. <https://doi.org/10.3390/ma14226746>
172. Parviz Nabil*, Diana Petkova1, Ted Donchev. Behaviour of Columns Constructed with Internal FRP Reinforcement Under Axial Loading. 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2020), Istanbul 1-3 July 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-88166-5_76
173. Patriarca L., Foletti S., Beretta S. LCF and crack growth: recent results obtained by DIC. *In MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*. 2018. Vol. 165, P. 01001.
174. Piero Colajanni, and Salvatore Pagnotta. Influence of the effectiveness factors in assessing the shear capacity of rc beams strengthened with FRP. *COMPDYN* 2021. 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.) Streamed from Athens, Greece, 27–30 June 2021

175. Pohoryles, D.A.; Melo, J.; Rossetto, T. Combined Flexural and Shear Strengthening of RC T-Beams with FRP and TRM: Experimental Study and Parametric Finite Element Analyses. *Buildings* 2021, 11, 520. <https://doi.org/10.3390/buildings11110520>
176. Rahul Raja S, Victor Sagaya Raj U, Sriram K, Rahul PS, Vedhanayaghi VJ. Retrofitting of RC beams using CFRP. *Int J Emerg Technol Adv Eng* 2018;8(6): 112–4
177. Rashid, R. S., Husin, S. R., Lee, W. Y., Yazid, M. A., & Shukri, A. A. (2023). Carbonation of Bridge Deterioration in High Rainfall Tropical Region. *Structural Engineering International*, 1-8. <https://doi.org/10.1080/10168664.2023.2178994>
178. Rastogi P. K. *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*. Chichester: John Wiley and Sons. 2001. 368p
179. Rong, X. L., Li, L., Huang, W. Y., Dong, L. G., Zheng, S. S., Wang, F., ... & Wang, J. Y. (2023). Experimental investigation of the seismic resistance of RC beam–column connections after freeze–thaw cycle treatment. *Engineering Structures*, 290, 116330. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116330
180. Saljoughian A, Mostofinejad D (2020) Behavior of RC columns confined with CFRP using CSB method under cyclic axial compression. *Constr Build Mater* 235:117786. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117786
181. Sanchez-Silva, M., & Riascos-Ochoa, J. (2013). Seismic risk models for aging and deteriorating buildings and civil infrastructure. In *handbook of seismic risk analysis and management of civil infrastructure systems* Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering 2013, Pages 387-409. <https://doi.org/10.1533/9780857098986.3.387>
182. Sarhat S. R., Abdul-Ahad R. B. The combined use of steel fibers and stirrups as shear reinforcement in reinforced concrete beams. *Special Publication*, 2006, 235, 269-282.
183. Schreier H., Orteu J. J., Sutton, M. A. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media. 2009. 322 p.

184. Schreier H.W., Braasch J.R. Sutton M.A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. *Opt. Eng.* 2000. Vol. 39. No 11. P. 2915-2921.
185. Shkurupiy, A. A., Mytrofanov, P. B., Davydenko, Y. O., & Horb, A. G. (2019, December). Statistical characteristics of strength distribution of normal sections of bended reinforced concrete elements and their analysis. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 708, No. 1, p. 012072). IOP Publishing.
186. Sjodahl M. Some Recent Advances in Electronic Speckle Photography. *Opt. Las. Eng.* 1998. Vol. 29. P.125-144.
187. Solid Mechanics DIC. *Dantec Dynamics*. URL: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/stress-strain-espi-dic/digital-image-correlation-dic/>.
188. Speckle Pattern Fundamentals. *Correlated Solutions, Inc. Knowledgebase Technical Articles* 2021. 12 p. URL: <https://correlated.kayako.com/article/38-speckle-pattern-fundamentals>
189. Storozhenko, L., & Gasii, G. (2020). Experience and current issues of designing of steel and concrete composite structures of roof and floor systems. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(55), 15-25.
190. StrainMaster. Digital Image Correlation Systems for Full Field Shape, Displacement and Strain. Manual. *LaVision*. 20 p. URL: <https://www.lavision.de/de/products/strainmaster/index.php>.
191. Su, C., & Anand, L. (2003). A new digital image correlation algorithm for whole-field displacement measurement.
192. Szewczak I., Rozylo P., Rzeszut K. Influence of Mechanical Properties of Steel and CFRP Tapes on the Effectiveness of Strengthening Thin-Walled Beams. *Materials*, 2021, 14, 2388. <https://doi.org/10.3390/ma14092388>
193. Szewczak I., Rzeszut K., Rozylo P. Structural behaviour of steel cold-formed sigma beams strengthened with bonded steel tapes. *Thin-Walled Struct*, 2021, 159, 107295. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107295>

194. Tang Z. Z., Liang J., Xiao Z. Z., Guo C., Hu H. Three-dimensional digital image correlation system for deformation measurement in experimental mechanics. *Optical Engineering*. 2010. Vol. 49. No 10. P.103601.
195. Task Group 9.3 FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures. Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. 2001.
196. Tian S., Zhang X., Hu W. Fatigue Analysis of CFRP-Reinforced Concrete Ribbed Girder Bridge Deck Slabs. *Polymers*, 2022, 14, 3814. <https://doi.org/10.3390/polym14183814>
197. Tommaso D'Antino¹; Francesco Focacci²; Lesley H. Sneed, M.ASCE³; and Carlo Pellegrino⁴. Shear Strength Model for RC Beams with U-Wrapped FRCM Composites. *J. Compos. Constr.*, 2020, 24(1): 04019057. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000986.
198. Vatulia G.L., Smolyanyuk N.V., Shevchenko A.A., Orel Ye. F., Kovalov O. M. Evaluation of the load-bearing capacity of variously shaped steel-concrete slabs under short term loading, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, 1002,012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1002/1/012007>
199. Vatulia, G., Rezunenکو M., Petrenko D., Rezunenکو S. Evaluation of the carrying capacity of rectangular steel-concrete columns. *Civil and Environmental Engineering*, 2018, 14(1/2018), 76-83, <https://doi.org/10.2478/cee-2018-0010>
200. Vatulia, G., Rezunenکو M., Petrenko, D., Balaka, Y., & Orel, Y. (2020). A statistical method for predicting the eccentric load capacity of rectangular concrete filled steel tubular columns. *Web of Conferences EDP Sciences*.
201. Vavruš M, Koteš P. Numerical comparison of concrete columns strengthened with layer of fiber concrete and reinforced concrete. *Transp Res Proc* 2019; 40:920–6. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.129>.
202. Vavruš M. Influence of fiber length on load-bearing capacity of strengthened cross-section using fiber reinforced concrete. *Transp Res Proc* 2021; 55:1106–13. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.081>.

203. Vavruš M., Koteš P. Methods of Modeling Contact between Concrete and Fiber Concrete. *Solid State Phenomena*, 2022, 329, 87-92. <https://doi.org/10.4028/p-1tqdjh>
204. VIC-2D. Refrence Manual. *Correlated Solutions, Inc. Knowledgebase-Manuals and Guides*. 26 p. URL: <https://correlated.kayako.com/article/87-vic-volume-manual>.
205. VIC-2D. Refrence Manual. Correlated Solutions. URL: <http://www.correlatedsolutions.com/installs/Vic-2D-2009-Manual.pdf>. (дата звернення: 02.03.2023).
206. Wang W. 2018. Research on Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Bolted Bottom Steel Plate. Master's Thesis, Chengdu University of Technology, Chengdu, China
207. Wang, L. Deformation Measurement of Scaling and Rotation Objects Based on Digital Image Correlation Method with Color Information. *Photonics* 2022, 9, 237. <https://doi.org/10.3390/photonics9040237>
208. Wassel Al-Bodour, Yasmin Murad, Rana Imam & Yahia Smadi (2022) Shear strength investigation of the carbon fiber reinforced polymer-wrapped concrete beams using gene expression programming and finite element analysis, *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 7:1, 15-24, DOI: 10.1080/24705314.2021.1971891
209. Wensu Chen a, Thong M. Pham a, Henry Sichembe a, Li Chen b, Hong Hao. Experimental study of flexural behaviour of RC beams strengthened by longitudinal and U-shaped basalt FRP sheet. *Composites Part B* 134 (2018) 114e126. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.053>
210. Xu Y, Huang J (2020) Cyclic performance of corroded reinforced concrete short columns strengthened using carbon fiber-reinforced polymer. *Constr Build Mater.* 247, 118548. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118548
211. Yang, J. Q., Smith, S. T., Wang, Z., & Lim, Y. Y. (2018). Numerical simulation of FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors. *Construction and*

- Building Materials, 172, 735-750.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.133>
212. Yin X., Lin Q., Li K. Calculation of flexural capacity of reinforced concrete slab strengthened with profiled steel sheeting and concrete. *Sichuan Build. Sci.*, 2020, 46, 1–7.
213. Zeng H., Lu C., Zhang L., Yang T., Jin M., Ma Y., Liu J. Prediction of Temperature Distribution in Concrete under Variable Environmental Factors through a Three-Dimensional Heat Transfer Model. *Materials*, 2022, 15, 1510.
<https://doi.org/10.3390/ma15041510>
214. Zhang Q., Cao W. Application of structure strengthening with steel plate and concrete in construction engineering. *Sichuan Build. Sci.*, 2022, 48, 30–35
215. Zhang Y., Zhu Y., Qu S., Kumar A., Shao X. Improvement of flexural and tensile strength of layered-casting UHPC with aligned steel fibers. *Constr. Build. Mater.* 2020. Vol. 251 P.118893–118911.
216. Zhang, Y.; Li, N.; Wang, Q.; Li, Z.; Qin, X. Shear Behavior of T-Shaped Concrete Beams Reinforced with FRP. *Buildings* 2022, 12, 2062.
<https://doi.org/10.3390/buildings12122062>
217. Zhu M., Ueda T., Zhu, J. H. (2020). Generalized evaluation of bond behavior of the externally bonded FRP reinforcement to concrete. *Journal of Composites for Construction*, 24(6), 04020066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001081)
218. Zhu, X., Chen, Z., Wang, H., Chen, Y., & Xu, L. (2018). Probabilistic generalization of a comprehensive model for the deterioration prediction of RC structure under extreme corrosion environments. *Sustainability*, 10(9), 3051.
<https://doi.org/10.3390/su10093051>
219. Žmindák, M., Novák, P., & Dekýš, V. (2017). Analysis of bond behaviour in strengthened reinforced concrete beam with carbon fiber reinforced polymer lamella. In *MATEC Web of Conferences*, 107, 00045. EDP Sciences.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201710700045>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Визначення пріоритетних факторів для дослідження і планування програми досліджень в комплексі Ansys DesignXplorer.

Додаткова візуалізація.

Даний додаток наводить додатковий ілюстративний матеріал і перелік скорочень до розділу 2.1.

Перелік умовних скорочень

DE	Design exploration	GoF	Goodness of fit
DP	Design points	GDO	goal-driven optimization
DOE	Design of experiment	DSP	Decision Support Process
GA	Genetic aggregation	MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm
RMSE	Root mean square error	NSGA-II	Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II
PRESS	Predicted residual sum of squares		

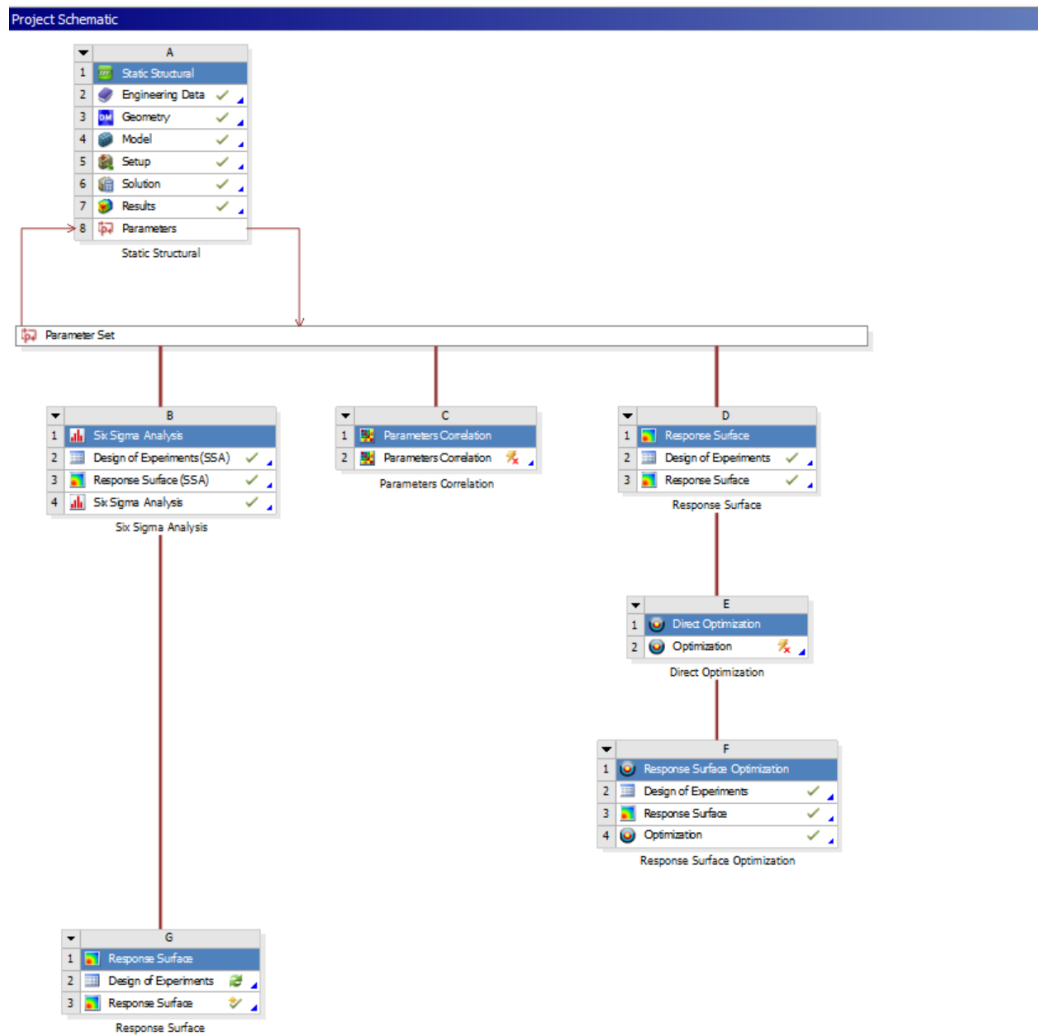


Рис.А.1. Загальна схема Ansys DesignXplorer для аналізу параметрів конструкції на основі поверхні відгуку.

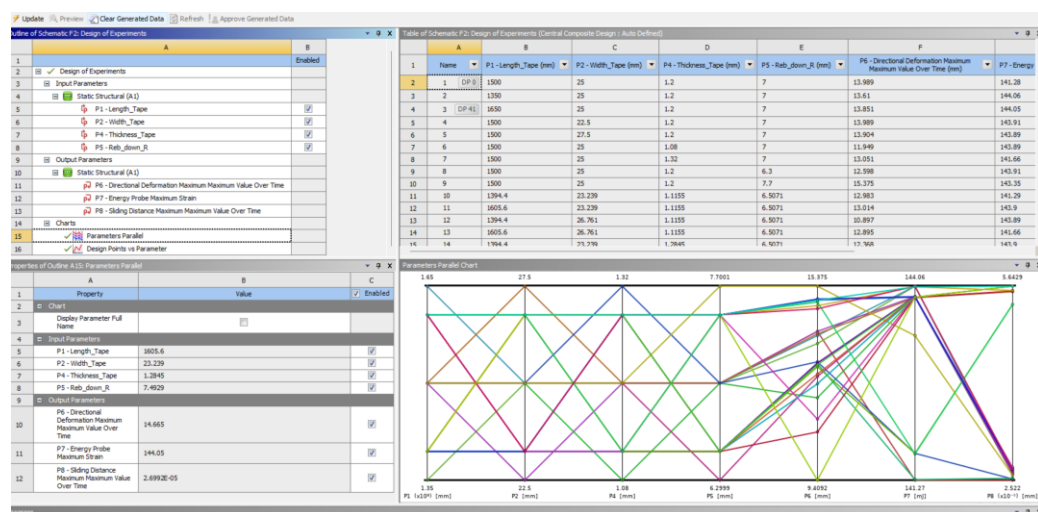


Рис.А.2. Ранжування точок комбінації внутрішніх параметрів системи для опису діапазону їх значень.

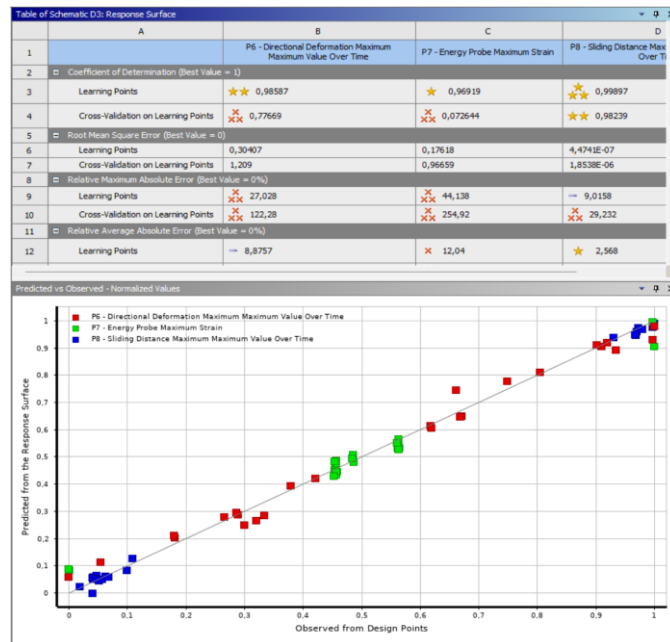


Рис.А.3. Визначення точок екстремуму поверхні відгуку і їх крос-валідація на генерованих результатах.

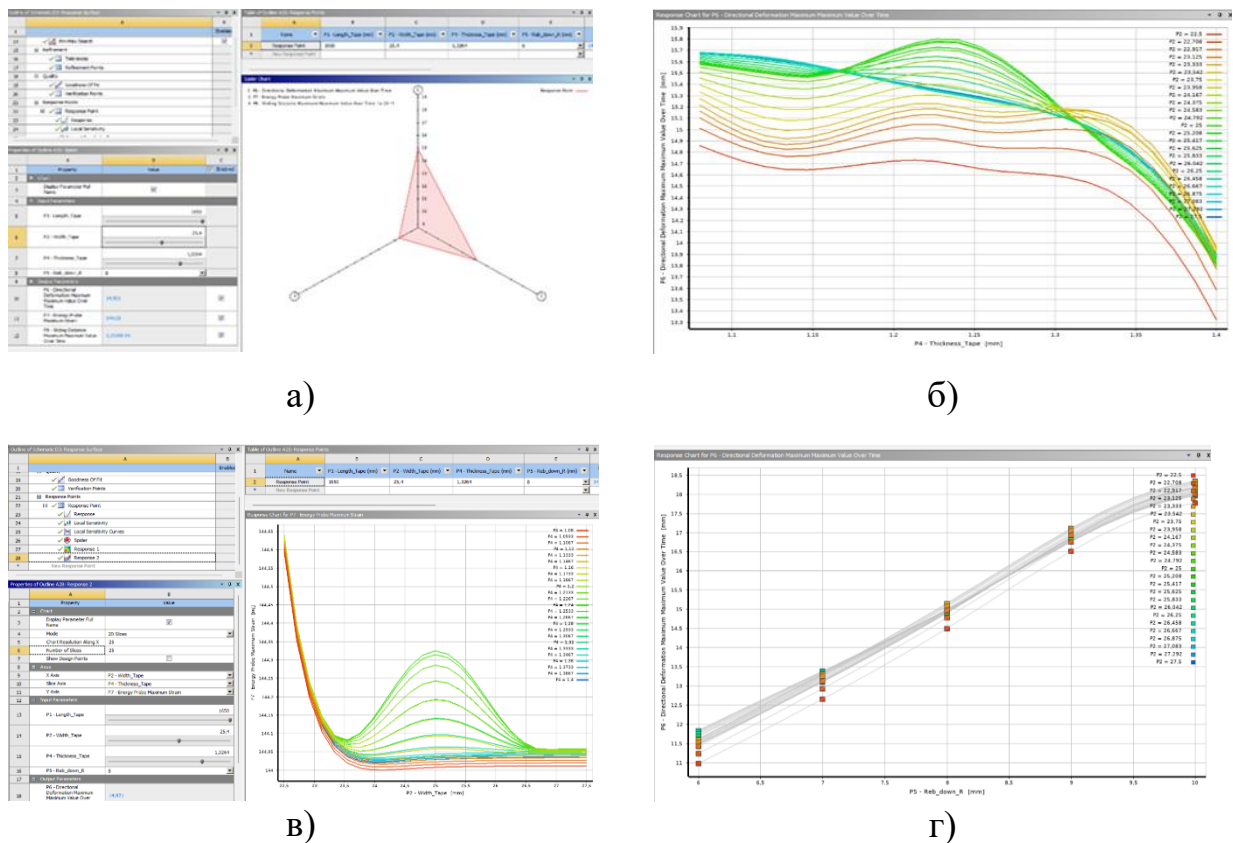


Рис. А.4. Візуалізація зв'язку між вхідними і вихідними параметрами в Ansys DesignXplorer: а)- діаграма Spider типу (для візуалізації впливу зміни вхідних параметрів на всі вихідні параметри одночасно); б- г) 2D-діаграми (для кількісного аналізу)

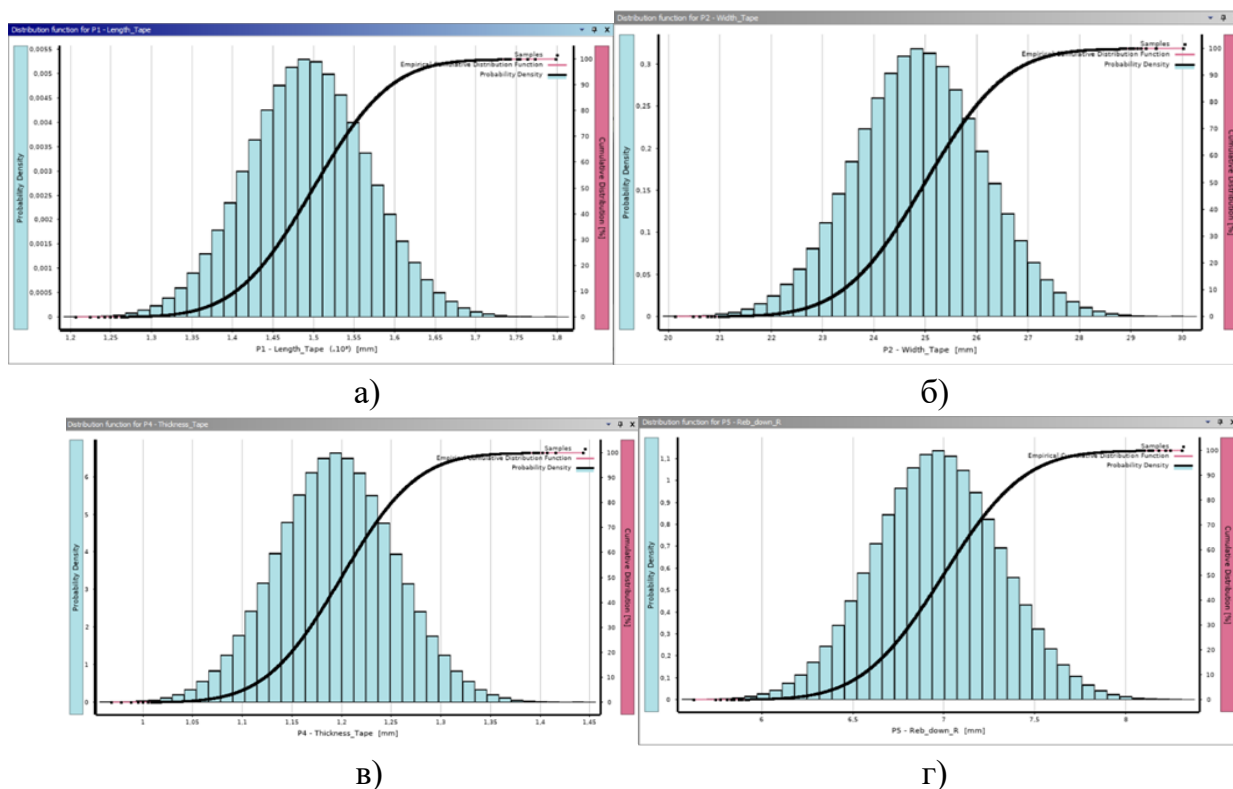


Рис.А.5. Статистичні функції нормального розподілу для опису вхідних параметрів системи: а)-Довжина стрічки P1, б)-Ширина стрічки P2, в)-Товщина стрічки P3, г)-Залишковий радіус (діаметр) арматури P4

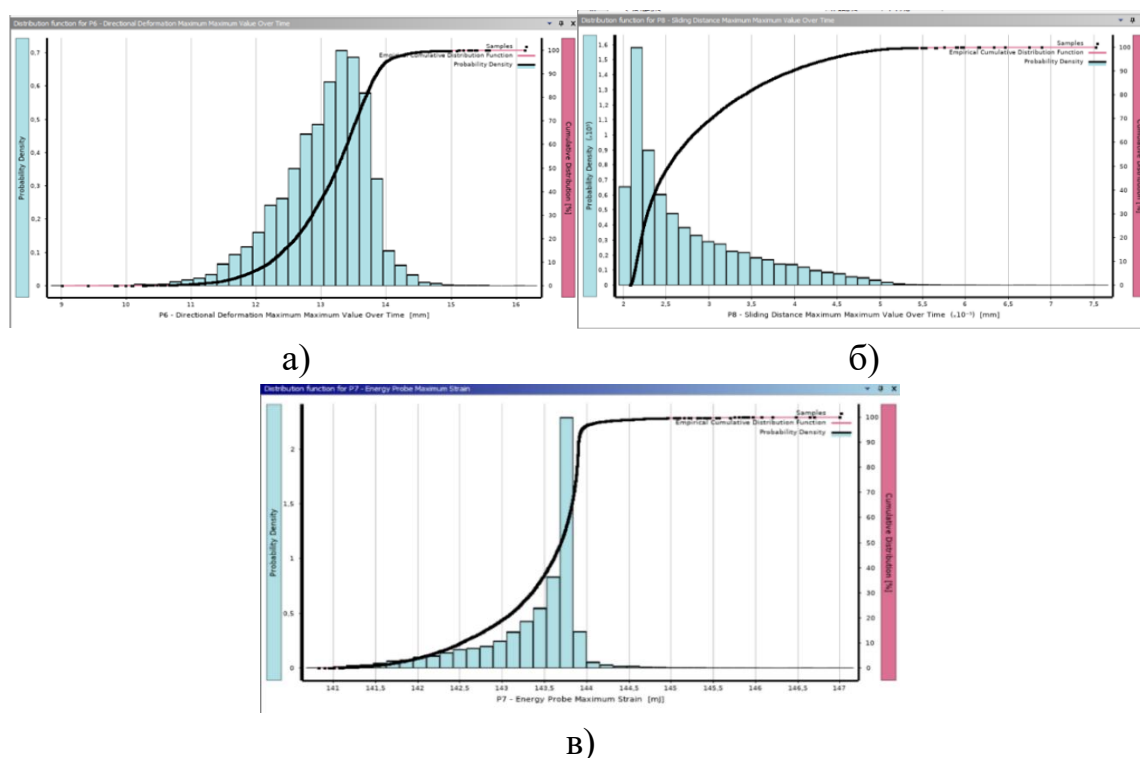


Рис.А.6. Кумулятивні функції розподілу вихідних параметрів: а) P5-Прогин, б) P6-Енергія, витрачена на деформацію, в) P7-Відстань проковзування стрічки

ДОДАТОК Б. Визначення величини необхідного анкерного закріплення композитної стрічки.

Стрічку наклеювали на нижню розтягнуту грань балки, забезпечуючи при цьому анкерування за допомогою заведення її на необхідну відстань за межі зони чистого згину на необхідну довжину, згідно з наступною схемою (див. рис.Б.1.).

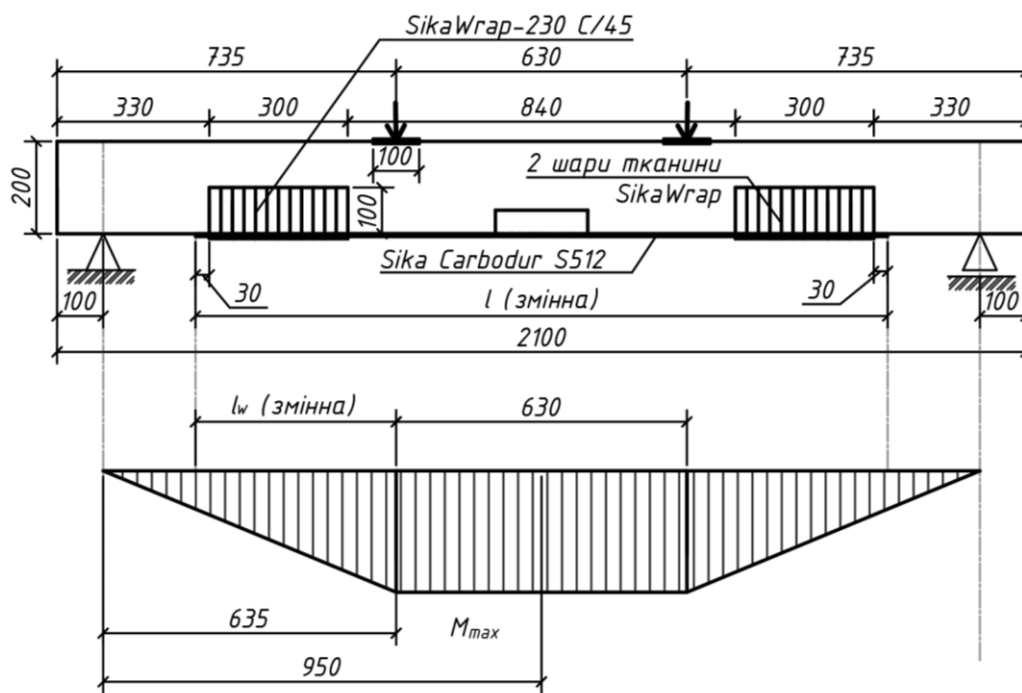


Рис.Б.1. Схема для визначення необхідної довжини стрічки для забезпечення анкерування

Величина довжини необхідного анкерного закріплення l_w визначається за виразом [21]:

$$l_w = \frac{\gamma_R \sigma_{Ld} t_L}{\tau_{Rd}} + 0.5h \geq 0.5 \text{ м}, \quad (\text{Б.1})$$

При цьому має виконуватись нерівність: $\gamma_R Z_{Ld} \leq f_{Lu} b_L t_L$,

де h -висота перерізу (м); b_L , t_L -ширина і товщина стрічки, відповідно; γ_R -коефіцієнт надійності; σ_{Ld} -розрахункове значення напружень в стрічці підсилення в розрахунковому перерізі (МПа); τ_{Rd} -розрахункова міцність бетону на відрив; Z_{Ld} -зусилля, що повинне сприйматись анкерним закріпленням (МН); f_{Lu} -міцність стрічки на розтяг (МПа).

Таблиця Б.1.

Результати необхідної довжини анкерування для експериментальних зразків

Балки серії	l_w розраховане (прийняте), мм	l стрічки, мм
1	2	3
ПБ-1	585.98 (600)	1830
ПБ-2	572.728 (585)	1800
ПБ-3	516.69 (535)	1700
ПБ-4	494.89 (500)	1630
ПБ-5	473.69 (485)	1600

ДОДАТОК В. Вибір регресійної моделі для опису характеристик термічно-зміцненої арматури

В.1. Особливості фізико-механічних характеристик термічно-зміцненої арматури

В даній роботі для армування залізобетонних зразків в як робоча арматура були використані стрижні термічно-зміцненої арматури Ø20A500C, сточені до певного ефективного діаметра, що імітує різний ступінь рівномірної корозії. Особливістю такої арматури є те, що внаслідок термічного зміцнення арматурний стержень набуває специфічних покращених фізико-механічних властивостей. Для гартування конструкційної сталі виконують комплекс операцій в такій послідовності: нагрівання в певному температурному режимі із відповідною швидкістю, витримка за цього температурного рівня і подальше швидке охолодження арматури (див. рис.В.1).

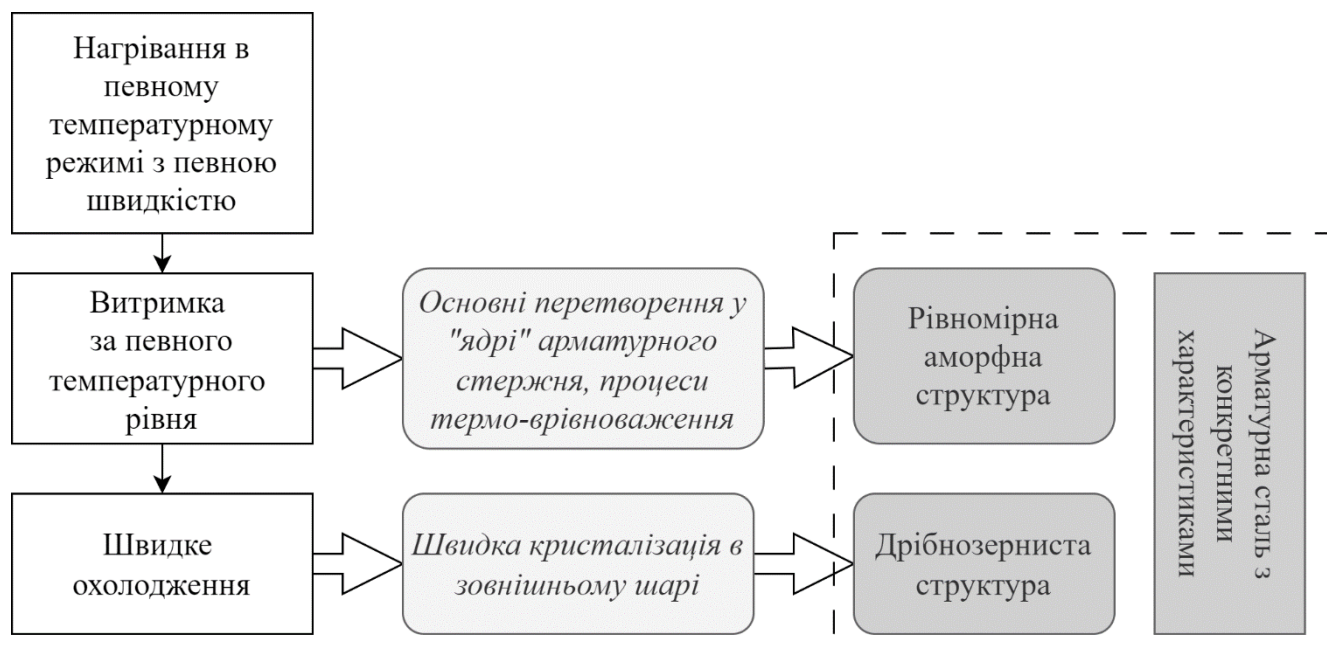


Рис.В.1. Процес формування неоднорідних характеристик термічно-зміцненої арматурної сталі.

Оскільки операції з термічного зміцнення виконуються в певному швидкісному режимі протягом короткого проміжку часу, то температурні перетворення є різними за інтенсивністю в різних зонах арматурного стержня. Найбільший вплив зміни температурні протягом гартування арматурного

стержня мають в його зовнішньому шарі («оболонці»), де сталь після досягнення аустенітної температури набуває неоднорідних характеристик; після швидкого охолодження арматурна сталь входить в фазу мартенситного типу. Для такого матеріалу характерна дрібнокристалічна структура, в якій зерна з меншим розміром і більшою питомою поверхнею, міцнішими зв'язками на мікро- рівні, що зумовлюють підвищену твердість і нижчу пластичність. Відповідно, зовнішній шар арматурного стержня характеризується вищими показниками твердості, межі текучості міцності на розтяг, при чому значення граничної деформації знижується. Оскільки процес гартування є короткотривалим, то у внутрішньому «ядрі» інтенсивність зміни температури є меншою, там спостерігаються процеси «термо-врівноваження». Як результат, внутрішня частина арматурного стержня містить більшу кількість залишкового аустеніту, що зумовлює нижчі значення міцності твердості і загалом більш однорідну структуру аморфного типу. «Ядро» містить значну частку ферлітно-перлітної фази, тому його матеріал має кращі деформаційні властивості і вище значення граничного видовження. Неоднорідність характеристик вздовж перерізу арматурного стержня зумовлює ускладнення напружено-деформованого стану і зони із концентрацією напружень. Більш детальний опис впливу термічного зміцнення на властивості арматурного стержня (фізичні, механічні і хімічні властивості, корозостійкість, схильність до міжкристалічних тріщин, тощо) детально описано в ряді попередніх робіт [10,73,141]. Така неоднорідність міцнісних характеристик вздовж поперечного перерізу термічно-зміцненого арматурного стержня є додатковим впливовим фактором несучої здатності конструкції з такою арматурою при наявності корозійних пошкоджень. Отже, при оцінці роботи залізобетонних елементах з певним рівнем корозії термічно-зміцненої арматури необхідно використовувати чисельні моделі, які враховують таку неоднорідність. Цей розділ дослідження присвячений розробці регресійної моделі арматурного стержня на основі експериментальних даних, які більш детально представлені в роботах [10,73,141]

В.2. Експериментальна база для розробки регресійної моделі. Оцінка достовірності експериментальних даних серії зразків

За експериментальну базу для розробки регресійної моделі для аналітичного моделювання зміни міцності термічнозміненої арматури вздовж перерізу прийнято дані попередніх досліджень, проведених в лабораторії Національного Університету «Львівська Політехніка» і описаних в попередніх роботах [8,10,73,141]. Дослідні зразки були виготовлені із арматурних стержнів Ø20A500C, в яких було виконано проточування до певного ефективного діаметру з кроком в 1 мм на ділянці в 100 мм, чим було забезпечено доступ до різних структурних шарів. Зразки було випробувано на розтяг згідно з ДСТУ EN ISO 6892-1:2022 [17] з синхронною реєстрацією навантаження, змінами в формі, видовженням в повздовжньому напрямку і відносним поперечним звуженням пошкодженої ділянки. Детальний моніторинг деформацій в локалізованому об'ємі на пошкодженій ділянці вимагає застосування спеціалізованих підходів. В даному випадку було застосовано методику цифрової кореляції зображень (ЦКЗ), які реєструвались монохроматичною камерою “Grasshopper 3” фірми Flir з об'єктивом Computar F25\2.8. Для мінімізації зовнішнього шуму і спотворень при замірюванні деформацій камеру було жорстко закріплено на нижній станині навантажувальної машини Р-100 на відстані 300 мм до досліджуваної проточеної ділянки. З давача тиску реєструвалось цифровим перетворювачем Е14-440 з програмним комплексом PowerGraph.

Відповідно, при випробуванні замірювались локальні істинні деформації, на основі яких було встановлено істинні напруження і побудовано діаграму напружено-деформованого стану в координатах « σ - ϵ ». Зокрема, усереднені дані про характеристики поперечного звуження k_μ , напружень при відриві і умовній текучості (σ_b , $\sigma_{0,2}$), істинних напружень (S_i) і деформацій (ϵ_y) для різних ефективних діаметрів $\varnothing_{eff}$ з урахуванням істинної площі поперечного перерізу F_i наведено в табл. В.1 [8,10,73,141].

Таблиця В.1.

Експериментальні дані випробувань арматурних зразків [8,10,73,141]

$\varnothing_{eff}$, мм	F_i , мм ²	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	S_i , МПа	e_y	k_μ
1	2	3	4	5	6	7
20	314	585.0	719	1370	0.89	0.30
19	284	552.4	665	1360	0.91	0.35
18	254	558.6	671	1328	0.93	0.37
17	227	554.4	665	1296	0.97	0.41
16	201	562.8	641	1285	1.08	0.42
15	177	490.6	622	1210	1.12	0.44
14	154	477.4	611	1180	1.18	0.47
13	133	467.8	599	1090	1.21	0.48
12	113	448.8	589	1022	1.34	0.48
11	95	446.4	575	981	1.37	0.48
10	79	439.6	563	975	1.41	0.48

В табл.В.1. наведено усереднені дані випробувань серій зразків. Оскільки в даному розділі основну увагу буде приділено міцнісним характеристикам, то розглянемо їх більш детально. Для кожного ефективного діаметра було випробувано 5 зразків в серії. Подальше статистичне опрацювання полягало в розрахунку таких значень для кожної серії з ефективним діаметром (математичне очікування $\overline{\sigma_{0,2}}$, середньоквадратичне відхилення D , коефіцієнт варіації ν дисперсія δ^2) за формулами (В.1-В.4):

$$\overline{\sigma_{0,2}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{0,2i}}{n}, \quad (\text{В.1})$$

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{0,2i} - \overline{\sigma_{0,2}})^2}, \quad (\text{В.2})$$

$$\nu = \frac{S}{\overline{\sigma_{0,2}}}, \quad (\text{В.3})$$

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{0.2i} - \overline{\sigma_{0.2}})^2}{n-1}, \quad (\text{B.4})$$

де $\sigma_{0.2i}$ - значення умовної межі текучості для одного зразка з серії, n - обсяг серії (5 зразків).

Результати розрахунків і результати їх статистичного аналізу наведено в табл. В.2.

Таблиця В.2

Дані умовної межі текучості зразків арматури, їх статистичні показники
[8,10,73,141]

Ефективний діаметр ϕ_{eff} , мм	Експериментальні дані $\sigma_{0.2i}$, МПа, для зразка із серії					Статистичний аналіз				
						$\overline{\sigma_{0.2}}$, МПа	D , МПа	δ^2 , МПа ²	ν	
	1	2	3	4	5				в.ч.	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
20	581.0	585.0	578.0	591.0	590.0	585.0	5.020	31.5	0.009	0.858
19	549.0	552.0	547.0	558.0	556.0	552.4	4.128	21.3	0.007	0.747
18	557.0	562.0	554.0	558.0	562.0	558.6	3.072	11.8	0.006	0.550
17	554.0	557.0	548.0	552.0	561.0	554.4	4.409	24.3	0.008	0.795
16	561.0	567.0	559.0	562.0	565.0	562.8	2.857	10.2	0.005	0.508
15	490.0	491.0	485.0	490.0	497.0	490.6	3.826	18.3	0.008	0.780
14	477.0	481.0	472.0	474.0	483.0	477.4	4.128	21.3	0.009	0.865
13	466.0	469.0	461.0	471.0	472.0	467.8	3.970	19.7	0.008	0.849
12	448.0	450.0	444.0	449.0	453.0	448.8	2.926	10.7	0.007	0.652
11	442.0	448.0	442.0	450.0	450.0	446.4	3.666	16.8	0.008	0.821
10	439.0	440.0	439.0	437.0	443.0	439.6	1.960	4.8	0.004	0.446
Середнє значення							3.633	17.3	0.007	0.715

Статистичний аналіз масиву статистичних даних передбачає перевірку його на наявність грубих промахів. З цією метою проводимо перевірку експериментальних даних за критерієм Стюдента. Основою цієї перевірки є порівняння розрахункового значення критерію Стюдента для конкретного числа з вибірки з табличним значенням:

Достовірність результатів перевіряємо за довірчою імовірністю 95 %, що є достатньою точністю для інженерних розрахунків. Величини в табл. В.3. свідчать про виконання умови достовірності, тому вибірка експериментальних даних не містить грубих похибок і коригування її не потрібне. Графіки для окремих серій зразків і усереднені величини умовної межі текучості для кожного структурного шару наведено на рис.В.2.

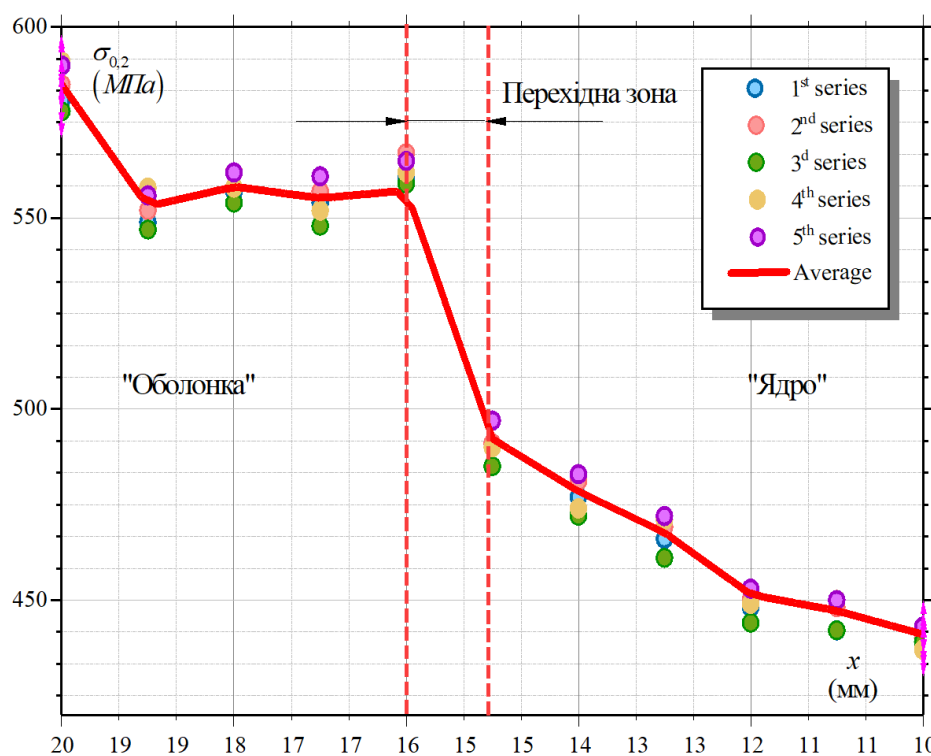


Рис.В.2. Розподіл характеристик міцності вздовж перерізу арматурного стержня: значення для 1-5 серій і усереднений графік (Average)

В.3. Побудова регресійної моделі міцнісних характеристик термічно-зміцненої арматури

В даній роботі буде розроблено регресійну модель міцнісних характеристик на прикладі арматурного стержня Ø20A500C. Загалом, аналіз графіків свідчить про три типові зони в перерізі (див. рис.В.3). В зовнішньому шарі товщиною 2 мм переважає дрібнокристалічна структура мартенситного типу із високими значеннями умовної межі текучості в межах 560...585 МПа. Внутрішнє ядро, діаметром орієнтовно 15 мм має більшу частку залишкового

аустеніту завдяки більшому часу термічних перетворень і характеризується більшою пластичністю і нижчою міцністю (439...490 МПа).

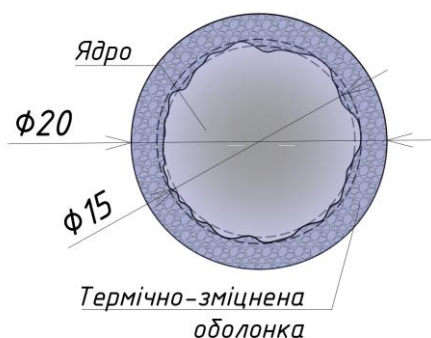


Рис.В.3. Структурні шари термічно-зміцненого арматурного стержня

Розробка регресійної моделі для аналітичного опису зміни характеристик вздовж перерізу арматури полягає у пошуку функціональної залежності виду $\sigma_{0.2} = f(x)$, яка б дозволила максимальне наближення до розподілу експериментальних даних. Такий регресійний аналіз проводимо методами автоматизованого статистичного моделювання. Оскільки наперед невідомо, якого виду математична модель буде найбільш доцільною, то необхідно перевірити декілька варіантів серед найбільш поширених серед інженерних задач. Відповідність кожної з них перевірятимемо за значенням коефіцієнта детермінації R^2 . Коефіцієнт детермінації математично описує ступінь варіації залежної змінної пояснюється незалежними змінними в регресійній моделі, що можна описати рівнянням:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}, \quad (B.6)$$

де SS_{res} -сума квадратів залишків регресії, SS_{tot} -загальна сума квадратів, які визначаються згідно з міркуваннями наведеними нижче.

Нехай маємо сукупність експериментальних значень y_i в діапазоні $[y_1, y_n]$, кожному з яких в регресійній моделі відповідатиме ряд даних $f_i \in [f_1, f_n]$. Визначаємо загальну суму квадратів і суму квадратів залишків регресії за формулами:

$$SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2, \quad (B.7)$$

$$SS_{res} = \sum_i (y_i - f_i)^2, \quad (B.8)$$

де $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n$ - середнє арифметичне вибірки.

Коефіцієнт детермінації R^2 може набувати значення в межах від 0 до 1. При цьому більші значення коефіцієнта свідчать про високу кореляцію між прогнозом даної моделі і фактичними експериментальними даними. Вважається, що при $R^2=1$ і $SS_{res}=0$ статистична модель максимально точно описує задану довільну залежність.

Спочатку розглянемо функцію, яка найбільш точно описує експериментальні дані, а саме функцію у формі поліному:

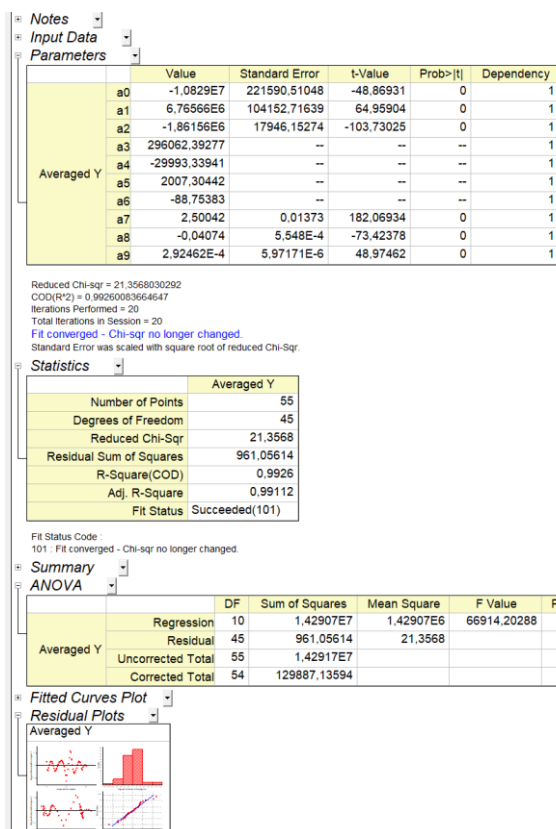
$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + a_5 \cdot x^5 + a_6 \cdot x^6 + a_7 \cdot x^7 + a_8 \cdot x^8 + a_9 \cdot x^9, \quad (B.9)$$

де a_i - довільним чином підібрані коефіцієнти, отримані ітераційним добором і наведені на рис. В.4.

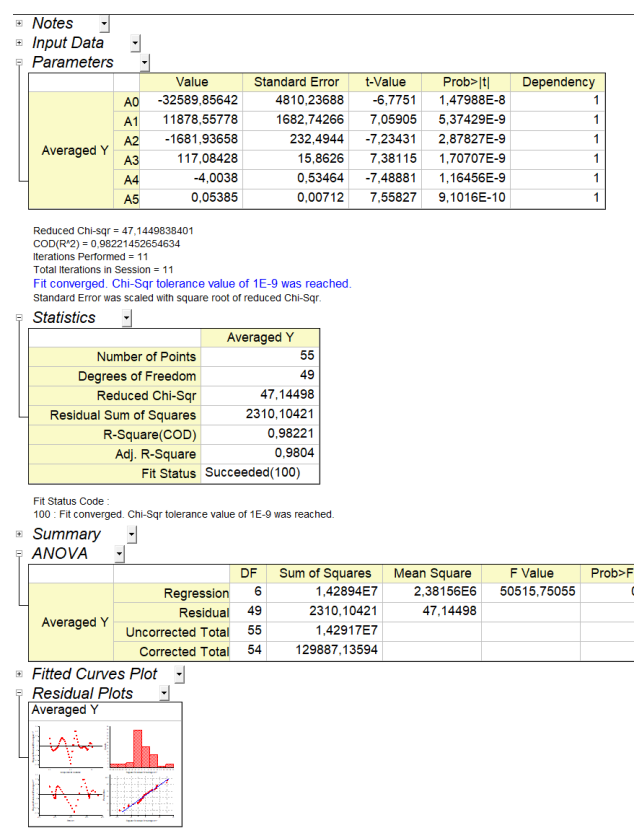
Як видно з рис.В.4 поліном 9-го ступеня описує експериментальні дані дуже точно при значенні $R^2=0.991$, однак функція (В.9) є незручною для практичного використання в розрахунках. Відповідно, на наступному етапі зробимо спробу описати апроксимовану функцію поліномом 5-го порядку. Математично регресійна модель поліному 5-го порядку описується рівнянням:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + a_5 \cdot x^5. \quad (B.10)$$

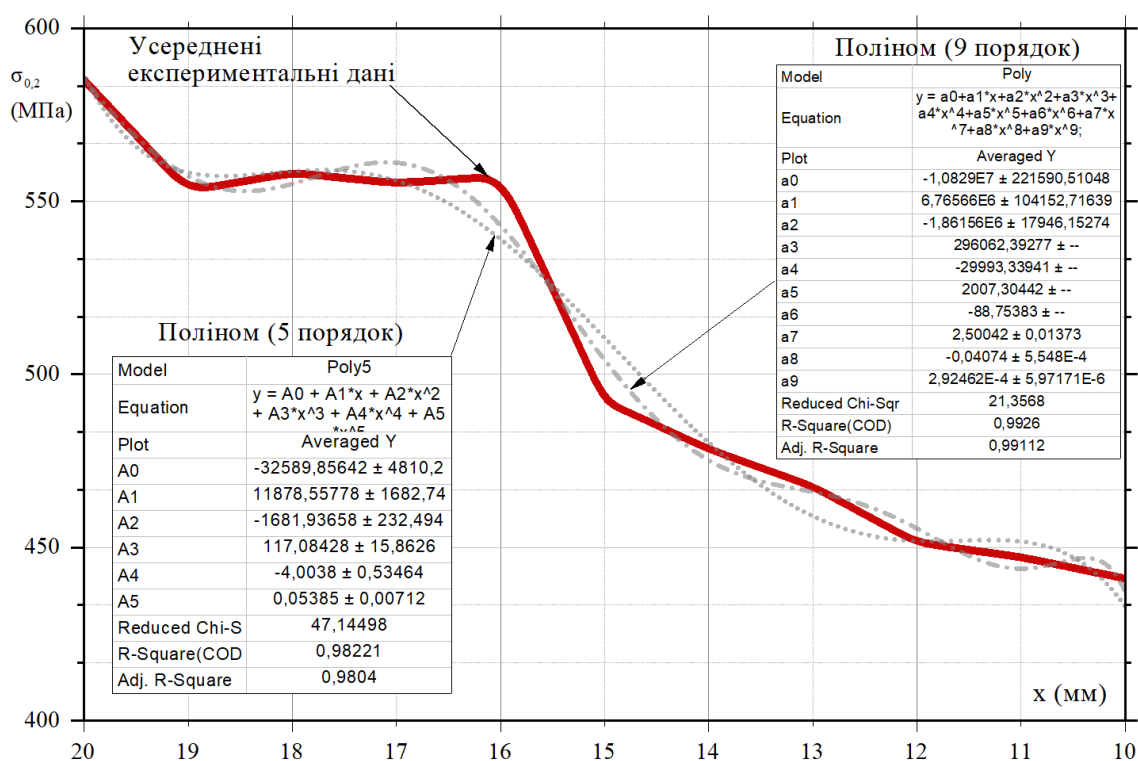
Як видно з рис. В.1 коефіцієнт детермінації в цьому варіанті досягає $R^2=0.980$, що є достатньою точністю для інженерних задач.



a)



б)



в)

Рис.В.4. Процес підбору регресійної моделі у формі поліному 5-го (а) і 9-го порядку (б); результуючі значення довільних коефіцієнтів і відповідні графіки отриманих функцій (в)

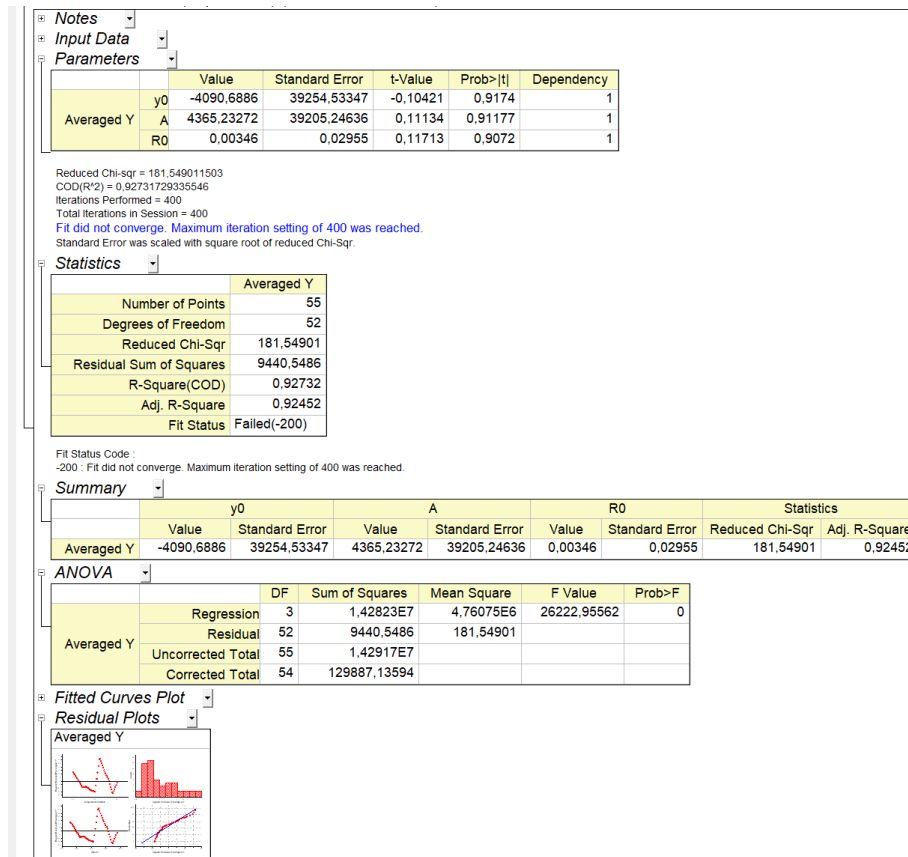
Необхідно відмітити, що хоча зменшення порядку поліному хоча і спрощує форму регресійної моделі, забезпечуючи при цьому достатню точність, однак не усуває інших недоліків поліноміальних функцій для опису статистичних даних. Зокрема, важливо брати до уваги, що висока кореляція статистичних моделей з експериментальними даними в поліноміальних функціях забезпечується їх гнучкістю і довільним вибором коефіцієнтів. Відповідно, поліном як рівняння для регресійної моделі має незначний фізичний зміст і описує частковий випадок конкретної вибірки зразків певного діаметра, а не загальну задачу опису міцнісних характеристик термічно-зміцненої арматури.

Розглянемо форми регресійних моделей, які застосовуються для опису фізичних процесів. Наприклад, апроксимація експериментальних даних експоненціальною залежністю має достовірне логічне обґрунтування. Загальний вигляд рівняння експоненти наступний:

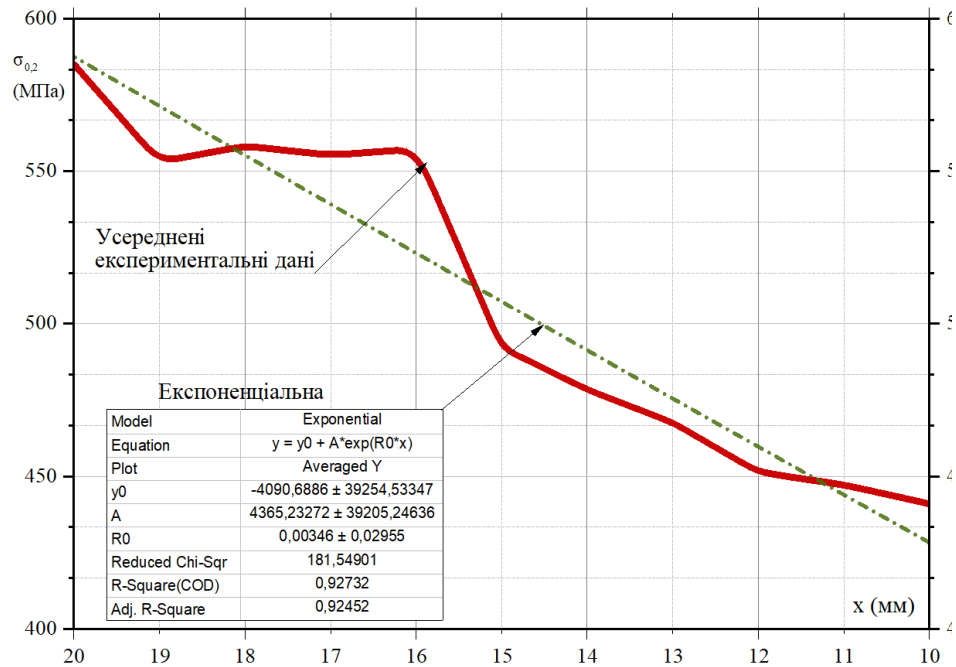
$$f(x) = y_0 + A \cdot e^{Rx}, \quad (\text{B.11})$$

де y_0 , A , R - довільні коефіцієнти рівняння.

Рівняння експоненти є поширеним в інженерній практиці, зокрема для задач молекулярно-кінетичної теорії, хімічних і фізичних процесів, тощо. Однак нижчий коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.924$ свідчить про низьку кореляцію такої функції з вихідними даними і ймовірну похибку, що перевищує бажану точність. Процес підбору регресійної моделі у формі експоненціальної залежності і відповідний графік після підбору коефіцієнтів наведено на рис. В.5.



a)



б)

Рис.В.5. Процес підбору регресійної моделі у формі експоненціальної залежності (а); результуючі значення довільних коефіцієнтів і відповідний графік (б)

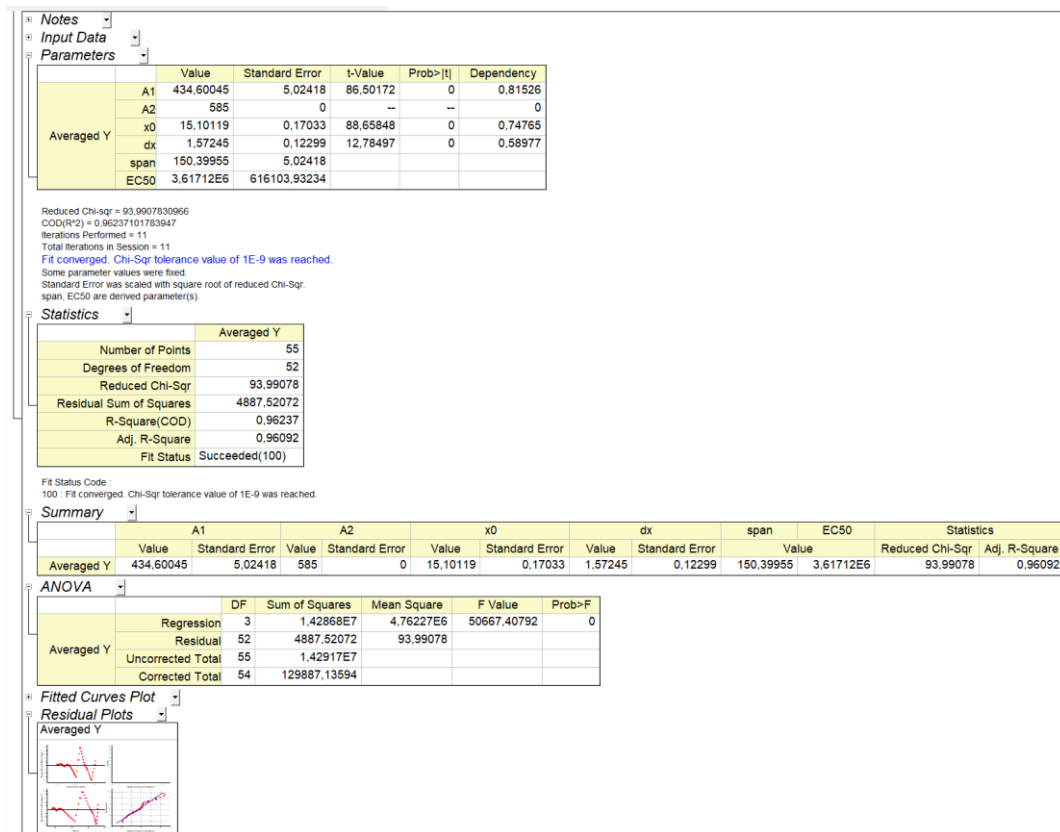
Наступним варіантом регресійної моделі є рівняння Больцмана виду (В.6):

$$f(x) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 - e^{\frac{x-x_0}{dx}}}, \quad (\text{В.6})$$

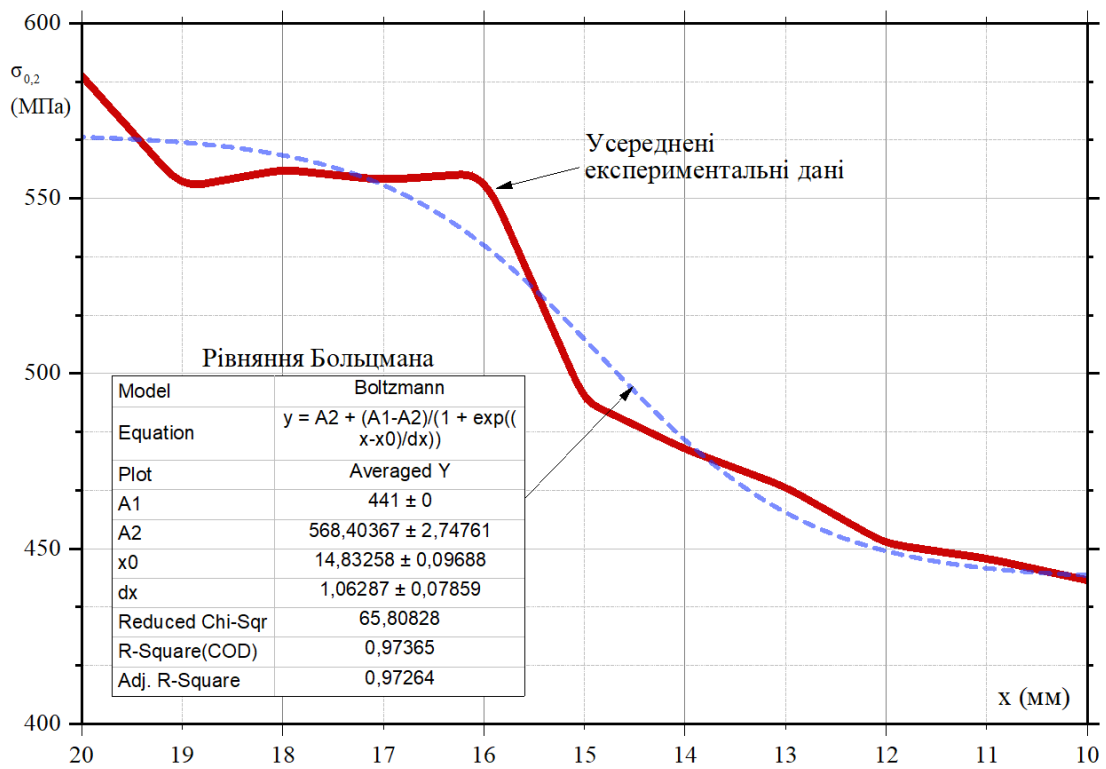
де x_0 , A_1 , A_2 , dx - довільно підібрані показники, згідно з рис.В.5.

Функція Больцмана використовується для багатьох задач, починаючи з опису розподілу частинок в термодинамічній системі, наприклад в нерівноважних газах, тощо. Також, функцію Больцмана використовують для математичного опису дифузійних, кінетичних, тепло- і масо-обмінних процесів, що добре відповідає випадку опису задачі термічного зміцнення арматурної сталі. Спроба описати статистичну модель рівнянням Больцмана (див. рис. В.6) засвідчила помітну схожість між графіками. Також, оскільки коефіцієнт детермінації є досить близьким до 1, зупинимось на цьому варіанті. Отже, в подальшому в даному дослідженні міцність арматури при її рівномірній корозії будемо описувати в залежності від глибини поширення корозійного шару наступним чином:

$$f_{yk}(x) = 568.40 \pm 2.75 + \frac{441.00 \pm 0 - 568.40 \pm 2.75}{1 - e^{\frac{x-14.83 \pm 0.09}{1.06 \pm 0.07}}}. \quad (\text{В.5})$$



a)



б)

Рис.В.6. Процес підбору регресійної моделі у формі розподілу Больцмана (а);
результуючі значення довільних коефіцієнтів і відповідний графік (б)

ДОДАТОК Г. Фотофіксація характеру руйнування залізобетонних балок

а)



б)

Рис. Г.1 (початок). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-1-3 і ПБ-1-4: а) загальний вигляд випробуваних зразків; б) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину; в) руйнування стиснутої зони.



в)

Рис. Г.1 (продовження). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-1-3 і ПБ-1-4: в) руйнування стиснутої зони.



а)



б)

Рис. Г.2 (початок). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-2-5 і ПБ-2-6: а) загальний вигляд випробуваних зразків; б) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину



б)

Рис. Г.2 (продовження). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-2-5 і ПБ-2-6: б) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину



в)

Рис. Г.2 (продовження). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-2-5 і ПБ-2-6: в) руйнування стиснутої зони.



а)



б)

Рис. Г.3 (початок). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-3-7 і ПБ-3-8: а) загальний вигляд випробуваних зразків; б) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину.



б)

Рис. Г.3 (продовження). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-3-7 і ПБ-3-8: б) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину.



в)

Рис. Г.3 (продовження). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-3-7 і ПБ-3-8: в) руйнування стиснутої зони бетону.



а)



б)

Рис. Г.4 (початок). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-4-9 і ПБ-4-10: а) загальний вигляд випробуваних зразків; б) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину.

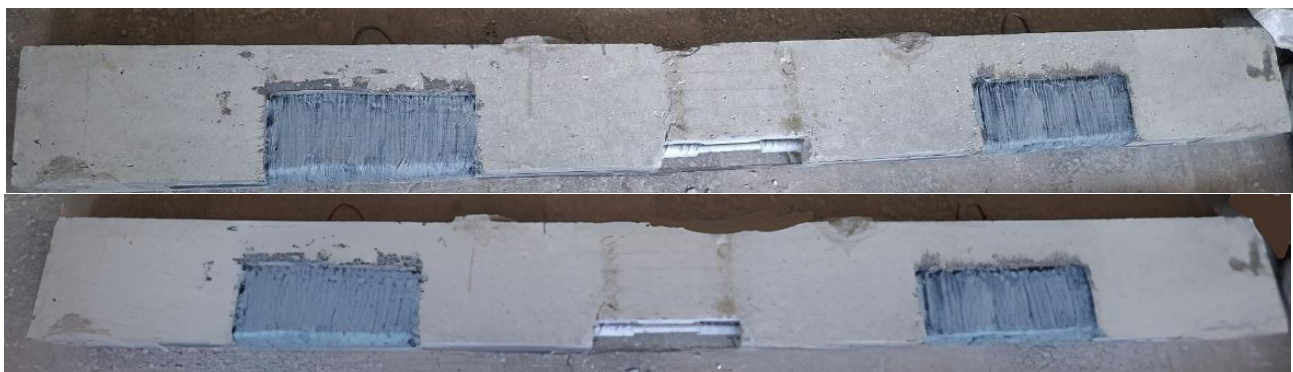


б)



в)

Рис. Г.4 (продовження). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-4-9 і ПБ-4-10: б) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину; в) руйнування стиснутої зони бетону.



а)



б)

Рис. Г.5 (продовження). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-5-11 і ПБ-5-12: а) загальний вигляд випробуваних зразків; б) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину.



б)



в)

Рис. Г.5 (продовження). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-5-11 і ПБ-5-12: б) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину; в) руйнування стиснутої зони бетону.



в)

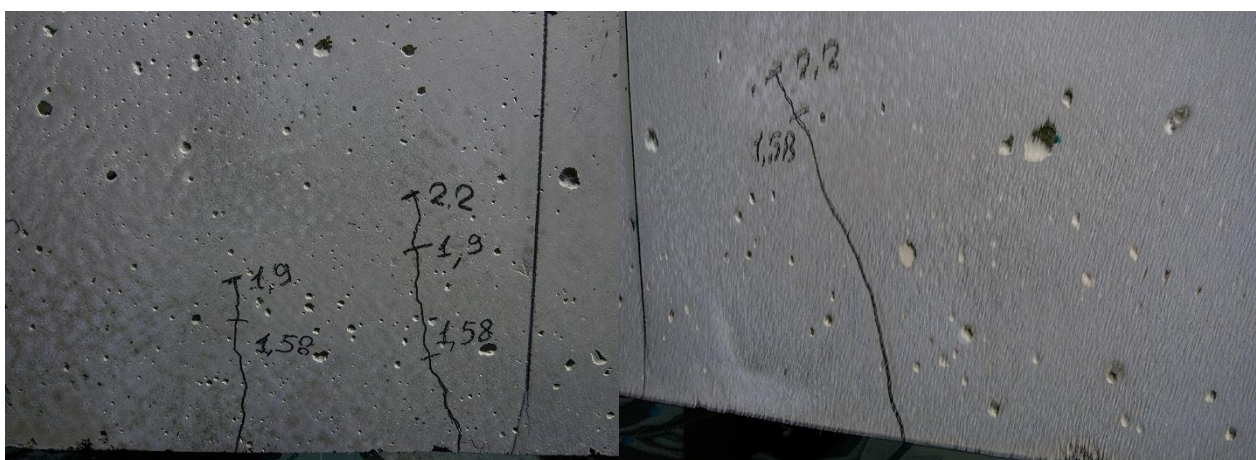
Рис. Г.5 (продовження). Фотофіксація випробуваних дослідних балок ПБ-5-11 і ПБ-5-12: в) руйнування стиснутої зони бетону.



a)



6)



B)

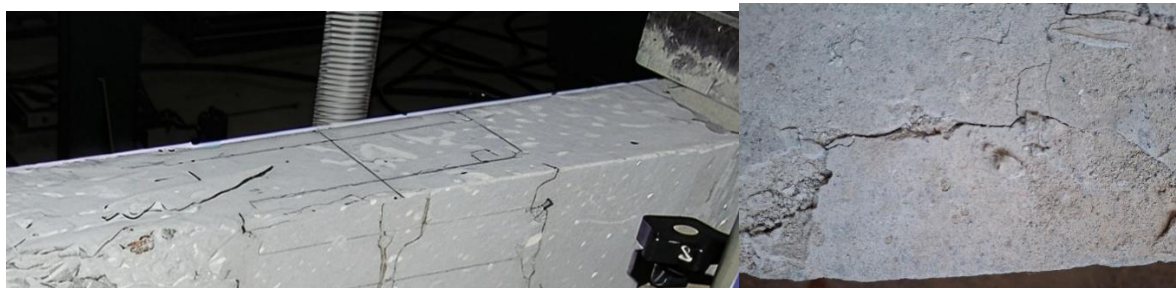
 $\Gamma)$

Рис. Г.6. Фотофіксація випробуваних дослідних контрольних балок КБ-0-1 і КБ-0-2: а) поширення тріщин в центральній зоні чистого згину; б) тріщини в зоні розтягу; в) руйнування стиснутої зони бетону.

ДОДАТОК Д. Список публікацій за темою дисертації

Публікації у закордонних наукових періодичних виданнях

1. Blikharskyu Y., Koptika N., Selejdak J. (2020) Non-uniform corrosion of steel rebar and its influence on reinforced concrete elements' reliability. *Production Engineering Archives*, 26(2), 67-72. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.14> (Scopus Q2, WOS) (*Blikharskyu Y.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копііка N.: проведено огляд літературних джерел, проведено дослідження; запропонована методика досліджень; проведено теоретичні дослідження; Selejdak J.: визначено напрям і основні завдання досліджень*).
2. Blikharskyu Y., Selejdak J., Koptika N. (2021) Specifics of Corrosion Processes in Thermally Strengthened Rebar. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00646, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00646> (Scopus, Q1) (*Blikharskyu Y.: запропонована методика досліджень, виконано аналіз отриманих результатів, сформовано висновки; Selejdak J.: визначено напрям і основні завдання досліджень; Копііка N.: сформульовано мету досліджень, проведено дослідження, сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті*).
3. Blikharskyu Y., Selejdak J., Koptika N. (2021) Corrosion fatigue damages of rebars under loading in time. *Materials*, 14(12), 3416; <https://doi.org/10.3390/ma14123416> (Scopus Q2, WOS) (*Blikharskyu Y.: запропонована методика досліджень, проведено дослідження, виконано аналіз отриманих результатів, сформовано висновки; Selejdak J.: визначено проблему і основні завдання досліджень; Копііка N.: сформульовано мету досліджень, сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті*).
4. Koptika N., Vegera, P., Vashkevych, R., Blikharskyu, Z. (2021) Stress-strain state of damaged reinforced concrete bended elements at operational load level. *Production Engineering Archives*, 27(4), 242-247. <https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.32> (Scopus Q2, WOS) (*Копііка N.:*

сформовано мету досліджень, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки; *Vegeera P.*: сформовано програму досліджень, проведено експериментальні випробування; *Vashkevych R.*: сформовано аналіз літературних джерел, виконано komponування статті; *Blikharskyu Z.*: визначено напрям, проблему і завдання досліджень, редагування, надання фахових консультацій).

5. Blikharskyu Y., Kapiika N., Khmil R., Selejdak J., Blikharskyu Z. (2022) Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress–Strain State of RC Structures. *Applied Sciences*, 12(19), 10157. <https://doi.org/10.3390/app121910157> (Scopus Q2, WOS) (*Blikharskyu Y.*: запропоновано методику досліджень, розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів сформовано висновки; *Kapiika N.*: сформовано мету досліджень, сформовано аналіз літературних джерел, проведено теоретичні дослідження, виконано komponування статті; *Khmil R.*: складено план досліджень, проведено аналіз результатів; *Selejdak J.*: визначено проблему досліджень; *Blikharskyu Z.*: визначено напрям і завдання досліджень, редагування, надання фахових консультацій)

6. Kapiika, N., Selejdak, J., Blikharskyu, Y. (2022). Specifics of physico-mechanical characteristics of thermally-hardened rebar. *Production Engineering Archives*, 28(1), 73-81. <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.09> (Scopus Q2, WOS). (*Kapiika N.*: сформовано мету досліджень, проведено дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, виконано komponування статті; *Selejdak J.*: визначено напрям і завдання досліджень, редагування; *Blikharskyu Y.*: запропоновано методику досліджень, проведення досліджень, розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів, сформовано висновки).

7. Blikharskyu, Y., Kapiika, N., Khmil, R., & Blikharskyu, Z. (2023). Digital Image Correlation Pattern for Concrete Characteristics—Optimal Speckle. In International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów, 22-31. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_3 (Scopus Q4, WoS) (*Blikharskyu Y.*:

визначено напрям і завдання досліджень, проведено експериментальні дослідження; Копііка Н.: запропонована методика досліджень, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки, редагування; Khmil R.: сформовано програму досліджень, виконано компонування статті, надання фахових консультацій; Blikharskyu Z.: визначено проблему досліджень, сформовано мету досліджень, надання фахових консультацій).

8. Kopiika, N., Blikharskyu, Y. (2024) Digital image correlation for assessment of bridges' technical state and remaining resource. *Structural Control and Health Monitoring*, 2024(1), 1763285. <http://dx.doi.org/10.1155/2024/1763285> (Scopus Q1, WoS). (Копііка Н.: сформовано мету досліджень, проведено теоретичні дослідження, сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: визначено напрям і завдання досліджень).

9. Kopiika, N., Blikharskyu, Y., Khmil, R., Tereshko, A. (2024). Design of Experiment for Facilitating Effective Research Program Development. In *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering*, 266-280. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_24 (Scopus Q4). (Копііка, Н.: сформульовано актуальність дослідження, проведено дослідження, проведено валідацію результатів, формальний аналіз, огляд і редагування; Blikharskyu Y.: проведено візуалізацію, проведено редакцію тексту; Khmil R.: проведено перевірку, згідно з нормативними документами; Tereshko, A.: сформульовано актуальність дослідження, проведено валідацію результатів, формальний аналіз, огляд і редагування).

10. Kopiika, N., Klym, A., Blikharskyu, Y., Katunský, D., Popovych, V. Blikharskyu, Z. (2024) Evaluation of the stress-strain state of the RC beam with the use of DIC. *Production Engineering Archives*, Sciendo, 30(4), 463-476. <https://doi.org/10.30657/pea.2024.30.44> (Scopus Q2, WOS) (Копііка Н.: запропоновано методику експериментальних випробувань, і експериментальну програму, виконано компонування статті, виконано теоретичні розрахунки; Клім А.: проведено експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів

досліджень, виконано моделювання MCE в програмі Femap; Blikharskyu Y.: консультування з використання обладнання і методики ЦКЗ; Katunsky D.: розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів; Porovych V.: участь в оформленні бібліографічних посилань; Blikharskyu Z.: надання фахових консультацій, редагування).

11. Koptika, N., Blikharskyu, Y., Selejdak, J., Khmil, R., Blikharskyu, Z., Katunsky, D. (2024). CFRP Materials for Restoration of the Bearing Capacity of RC Beams With Damaged Rebar. *Journal of Engineering*, 2024(1), 4915391. <http://dx.doi.org/10.1155/2024/4915391> (Scopus Q2, WOS) (Koptika N. : проведено експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів, надання консультацій з методики підсилення; Selejdak J.: визначено проблеми і завдання досліджень; Khmil R.: сформовано мету досліджень, запропонована методика досліджень; Blikharskyu Z.: надання фахових консультацій, редагування; Katunsky D.: участь в оформленні бібліографічних посилань, надання фахових консультацій).

12. Koptika, N., Blikharskyu, Y., Selejdak, J., Khmil, R., Blikharskyu, Z. (2025). Reliability-based analysis and residual life forecasting for corrosion-affected RC structures. In *Structures*, 76, 108965. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108965> (Scopus Q1, WOS) (Koptika N.: запропонована методика досліджень, виконано теоретичні розрахунки, виконано аналіз результатів досліджень, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: визначено напрям, проблеми і завдання досліджень; Selejdak J.: участь в оформленні бібліографічних посилань, Khmil R.: сформовано мету досліджень; Blikharskyu, Z.: надання фахових консультацій, редагування).

13. Koptika, N., Blikharskyu, Y., Khmil, R., Blikharskyu, Z. (2025). Probabilistic assessment of RC beams with corroded thermally strengthened reinforcement. In *Structures*, 77, 109104. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109104> (Scopus Q1, WOS)

(Копійка Н.: запропонована методика досліджень, виконано теоретичні розрахунки, виконано аналіз результатів досліджень, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: визначено напрям, проблеми і завдання досліджень; Khmil R.: сформовано мету досліджень, надання фахових консультацій; Blikharskyu, Z.: надання фахових консультацій, редагування)

14. Kopyika N., Blikharskyu Y., Sobko Y., Khmil R., Blikharskyu Z. (2025) Impact of CFRP-strengthening on Crack Formation in RC Structures. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. (1499), No 01202. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012021> *(Копійка Н. : проведено експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, виконано компонування статті, сформовані висновки; Blikharskyu Y.: розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів ; Sobko Y.: визначено проблеми і завдання досліджень, надання консультацій з методики підсилення; Khmil R.: сформовано мету досліджень, запропонована методика досліджень; Blikharskyu Z.: надання фахових консультацій, редагування)*

Публікації у наукових фахових виданнях України

15. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. (2019) Дослідження методик моніторингу і моделювання корозійних процесів в залізобетонних елементах. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, (77), 29–37. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-29-37> *(Бліхарський Я. З.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копійка Н. С.: сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті)*

16. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. (2019) Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць*, 37, 316–322. <http://dx.doi.org/10.31713/budres.v0i37.300> *(Бліхарський Я. З.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копійка Н. С.: сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті)*

17. Blikharskyu, Y. Z., Kopyika, N. S. (2020). Influence of steel rebar uniform corrosion on reinforced concrete structures strength. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (79), 34-42. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-34-42> (Blikharskyu Y. Z.: сформульовано мету досліджень, проведено дослідження, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копіика N. S.: запропонована методика досліджень, проведено дослідження, виконано компонування статті)
18. Blikharskyu Y., Kopyika N. (2020) Digital image correlation method for analysis of reinforced concrete structures. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (78), 27–33. <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2020-78-27-33> (Blikharskyu Y.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копіика N.: сформовано аналіз літературних джерел, розроблено ілюстративний матеріал, виконано компонування статті).
19. Blikharskyu Y., Kopyika N. (2021) Methods for determination of deformations with the use of Digital Image Correlation technologies. *Scientific Journal “Theory and Building Practice” Practice*, 3(2), 67-75. <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.02.067> (Blikharskyu Y.: визначено проблеми і завдання досліджень, надання фахових консультацій, редагування; Копіика N.: сформульовано мету досліджень, сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті)
20. Kopyika, N., Blikharskyu, Y. (2022). Effectiveness of strengthening of reinforced concrete beams with the use of composite materials. *Scientific Journal “Theory and Building Practice”*, 4(2), 7-16. <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.02.007> (Копіика N.: запропонована методика досліджень, виконано теоретичні розрахунки і дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки, виконано компонування статті; Blikharskyu Y.: визначено напрям і сформульовано мету досліджень, визначено проблеми і задачі дослідження, надання фахових консультацій, редагування).
21. Blikharskyu Y., Kopyika N. (2022) Analysis of the most common damages in reinforced concrete structures. *Scientific Journal “Theory and Building Practice”*,

4(1), 35-42. <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.01.035> (Blikharskyu Y.: визначено напрям і сформульовано мету досліджень, визначено проблеми і завдання досліджень; Копійка N.: сформовано аналіз літературних джерел, сформовані висновки, виконано компонування статті)

22. Копійка N., Blikharskyu, Y. (2023). Perspectives and specific features of the use of composite materials for strengthening of damaged reinforced concrete structures. December 2023, *Scientific Journal "Theory and Building Practice"*, (2), 27-34. <http://dx.doi.org/10.23939/jtbp2023.02.027> (Копійка N.: сформульовано мету досліджень, сформовано аналіз літературних джерел, сформовані висновки, виконано компонування статті; Blikharskyu Y.: визначено напрям і сформульовано мету досліджень, визначено проблеми і завдання досліджень, аналіз результатів дослідження, надання фахових консультацій)

Наукові праці, які засвідчують апробацію дисертації

23. Бліхарський Я. З., Вашкевич Р.В. Копійка Н.С. Бобало Т.В., Бліхарський З.Я. Визначення залишкової міцності залізобетонних балок з пошкодженням, що виникли при дії навантаження (2020). International Scientific Conference EET-2020 «Energy Efficiency In Transport», 67-69, November 18-20, 2020, Kharkiv, Ukraine (Бліхарський Я. З.: сформульовано мету досліджень, визначено напрям і завдання досліджень; Вашкевич Р.В.: запропоновано методіку експериментальних випробувань, редагування; Копійка Н.С.: сформовано аналіз літературних джерел, сформовані висновки, виконано компонування статті; Бобало Т.В.: виконано експериментальні дослідження; Бліхарський З.Я.: сформовано план досліджень, надання фахових консультацій)

24. Бліхарський Я.З., Хміль Р.Є., Копійка Н.С., Бліхарський З.Я. Експериментальні дослідження залізобетонних згинальних елементів з пошкодженою робочою арматурою. Тези VII Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, Україна, 12-15 травня, 2020 року), 172-173. (Бліхарський Я.З.: сформульовано мету досліджень, виконано експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів дослідження; Хміль Р.Є.: визначено напрям, завдання дослідження, сформовано програму

досліджень; Копійка Н. С.: сформовано аналіз літературних джерел, сформовані висновки, виконано компонування; Бліхарський З.Я.: запропоновано методику досліджень; надання фахових консультацій)

25. Копііка N., Blikharskyu Y.Z. (2024, April). The use of CFRP materials for strengthening of RC beams with corrosion damages of rebar. Тези Міжнародної Науково-технічної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (Одеса, Україна, 23 квітня 2024 року), 67-70 (*Копііка N.: запропонована методика досліджень, проведено експериментальні дослідження, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки; Blikharskyu Y.Z.: сформовано напрям, мету і завдання досліджень, редагування, надання фахових консультацій*).

Додаткові публікації, які висвітлюють тему дослідження :

1. Blikharskyu Y., Kopyika N., Volynets M., Bobalo T. (2019) Theoretical analysis of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate. 8th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» . November 20-22, 2019, Kharkiv, Ukraine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 708, 1, 012045. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012045> (Scopus Q4) (*Blikharskyu Y.: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копііка N.: розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів, виконано компонування статті, редагування; Volynets M.: надання консультацій з методики підсилення; Bobalo T.: запропоновано методику досліджень, виконано теоретичні розрахунки*).

2. Bobalo T., Blikharskyu Y., Kopyika N., Volynets M. (2020) Influence of the percentage of reinforcement on the compressive forces loss in pre-stressed RC beams strengthened with a package of steel bars. In International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering, 53-62. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_7 (Scopus Q4, WoS) (*Bobalo T: сформульовано програму експериментальних досліджень, проведено експериментальні випробування; Blikharskyu Y: сформульовано мету*

досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копііка N: запропоновано методику експериментальних досліджень і аналізу результатів досліджень, виконано компонування статті; Volynets M.: визначено основну проблему і задачі дослідження).

3. Bobalo T., Blikharskyu Y., Kopyika N., Volynets M. (2020) Serviceability of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate. In Proceedings of CEE 2019: Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering, 18, 25-33. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_4 (Scopus Q4, WoS) *(Bobalo T: сформульовано програму експериментальних досліджень, проведено експериментальні випробування; Blikharskyu Y: сформульовано мету досліджень, проведено аналіз результатів досліджень, сформульовані висновки; Копііка N: запропонована методика досліджень, виконано компонування статті, розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів ; Volynets M.: визначено основну проблему і задачі дослідження).*

4. Kramarchuk, A., Ilnytskyu, B., Kopyika, N. (2022) Ensuring the Load-Bearing Capacity of Monolithic Reinforced Concrete Slab Damaged by Cracks in the Compressed Zone. In International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering, 217-229. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_21 (Scopus Q4, WoS) *(Kramarchuk A.: сформовано мету досліджень, сформовані висновки, надання фахових консультацій; Ilnytskyu B.: визначено напрям, проблему і задачі досліджень, проведено натурні дослідження; Копііка N.: виконано компонування статті, виконано аналіз результатів досліджень, розроблено ілюстративний матеріал і візуалізація результатів).*

5. Bobalo T, Blikharskyu Y, Selejdak J, Kopyika N, Blikharskyu Z. (2023) Concrete Beams Reinforced with High Strength Rebar in Combination with External Steel Tape. Applied Sciences. 13(7):4528. <https://doi.org/10.3390/app13074528> (Scopus Q2, WoS). *(Bobalo T: визначено напрям і задачі досліджень, проведення експериментальних випробувань; Blikharskyu Y: запропоновано методику*

досліджень, сформовано аналіз літературних джерел; *Selejdak J.*: визначено проблему досліджень; *Копііка N.*: виконано компонування статті, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки; *Blikharskyu Z.*: сформовано мету досліджень, сформовано програму досліджень, редагування).

6. Blikharskyu Y., Selejdak J., Vashkevych R., Kopyika N., Blikharskyu Z. (2023) Strengthening RC eccentrically loaded columns by CFRP at different levels of initial load. *Engineering Structures. Engineering Structures*, 280, 2023 115694. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115694> (Scopus Q1, WoS). (*Blikharskyu Y.*: сформовано програму досліджень, проведення експериментальних випробувань; *Selejdak J.*: сформовано аналіз літературних джерел; *Vashkevych R.*: визначено проблему досліджень; *Копііка N.*: виконано компонування статті, виконано аналіз результатів досліджень; *Blikharskyu Z.*: сформовано мету досліджень, визначено напрям і задачі досліджень, надання фахових консультацій).

7. Blikharskyu Y., Vashkevych R., Kopyika N., Bobalo T., Blikharskyu Z. (2021) Calculation residual strength of reinforced concrete beams with damages, which occurred during loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1021(1), 012012. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012012> (Scopus Q4) (*Blikharskyu Y.*: визначено напрям досліджень, проведено теоретичні дослідження; *Vashkevych R.*: сформовано програму досліджень, виконано перевірку результатів досліджень; *Копііка N.*: сформовано мету досліджень, виконано аналіз результатів досліджень, сформовані висновки; *Bobalo T.*: сформовано аналіз літературних джерел, виконано компонування статті; *Blikharskyu Z.*: визначено проблему і задачі досліджень, редагування, накове консультування).

ДОДАТОК Є. Апробація результатів дисертаційного дослідження

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: XVII International Scientific Conference Lviv- Košice – Rzeszów «Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv- Košice – Rzeszów» (Rzeszów, Poland, 11-13 вересня, 2019 р.), 8th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Харків, Україна, 20-22 листопада, 2019 р.), VII Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, Україна, 12-15 травня, 2020 р.), International Scientific Conference EET-2020 «Energy efficiency in transport» (Харків, Україна, 18-20 листопада, 2020 р.), 17th International Conference on Quality Production Improvement-QPI 2023 (Zaborze, Poland, 14-16 червня, 2023 р.), XVIII International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv - Košice – Rzeszów (Rzeszów, Poland, 6-8 вересня, 2023 р.), IV Міжнародній науковій конференції «ЕкоКомфорт та актуальні питання в будівництві» (Львів, Україна, 11-13 вересня 2024 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (Одеса, Україна, 23 квітня 2024 р.), 18th International Conference Quality Production Improvement - QPI 2024 (Osjaków near Wieluń, Poland, 3-5 червня, 2024 р.), International Conference on Urban Infrastructure Sustainable Development and Renovation MistoBud-2025 (Харків, Україна, 30 січня- 1 лютого, 2025 р.).

ДОДАТОК Ж. Довідки про впровадження



АКТ

Про використання результатів дисертаційної роботи аспірантки кафедри автомобільних доріг та мостів **Копійки Надії Сергіївни** на тему «**Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсиленних карбоновими стрічками**»

Нами, головою науково-методичної ради Інституту будівництва та інженерних систем спеціальності G19 Будівництво та цивільна інженерія, к.т.н, доцентом Позняк О.Р., завідувачем кафедри автомобільних доріг та мостів д.т.н., професором Соболев Х.С., завідувачем кафедри будівельних конструкцій та мостів, д.т.н доцентом Хміль Р.С. складено даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Копійки Н.С. впроваджені в навчальний процес на кафедрах автомобільних доріг та мостів і будівельних конструкцій та мостів, зокрема при викладанні дисциплін.

- «Реконструкція будівель і споруд», що викладається для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності G19 Будівництво та цивільна інженерія, спеціалізації «Промислове та цивільне будівництво» (розділи 2.7. «Методика підсилення залізобетонних балок карбоновими стрічками»; 3.2. «Результати експериментальних досліджень залізобетонних балок»);
- «Наукові дослідження в будівництві», що викладається для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності G19 Будівництво та цивільна інженерія, спеціалізації «Автомобільні дороги і аеродроми» (розділ 2. «Матеріали і методика експериментальних досліджень»).

У вказаних дисциплінах використано методіку підсилення згинаних залізобетонних елементів карбоновим стрічками; матеріали експериментальних досліджень та аналізу реального напружено-деформованого стану залізобетонних балок, підсилених композитними стрічками; основні принципи методу цифрової кореляції зображень для дослідження напружено-деформованого стану в залізобетонних конструкціях.

Голова НМР ІБІС,
к.т.н, доцент

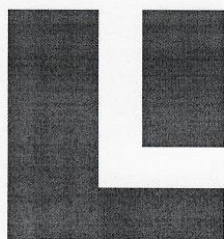
 Оксана ПОЗНЯК

Завідувач кафедри автомобільних доріг та
мостів, д.т.н. професор

 Христина СОБОЛЬ

Завідувач кафедри будівельних конструкцій та
мостів, д.т.н доцент

 Роман ХМІЛЬ



**LIGA
CONSTRUCTION**

ТОВ «ЛІГА КОНСТРАКШН»

ЄДРПОУ 39675404

ІПН 396754013501

Юридична адреса: 79035, м. Львів, вул. Зелена, 238-Б

Фактична адреса: м. Львів, вул. Хуторівка, 59-Б

IBAN UA 71 325365 0000000260090000235

в АТ «КРЕДОБАНК», МФО 325365

liga.lv2015@gmail.com

Вих № 119 від 05.06.2025 р.

Довідка

про впровадження результатів дисертаційної роботи Копійка Надії Сергіївни за темою
«Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених
карбоновими стрічками»

Будівельна практика вимагає постійного вдосконалення методів реконструкції та підсилення
конструкцій, особливо тих, що експлуатуються в складних умовах. Інноваційні рішення,
засновані на результатах наукових досліджень, допомагають ефективно вирішувати ці
завдання.

Під час реалізації проектів з обстеження технічного стану та підсилення залізобетонних
конструкцій у ТОВ «ЛІГА КОНСТРАКШН» були використані результати дисертації Копійка Надії
Сергіївни за темою «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої
арматури, підсилених карбоновими стрічками». Наукові рекомендації дозволили розробити
нові технічні рішення для підсилення балок із пошкодженнями арматури, що сприяло
покращенню експлуатаційної надійності конструкцій.

Директор ТОВ «ЛІГА КОНСТРАКШН»



Василь КАВА

БУДУЄМО ДОВІРУ

Вих. № 2 від 20.02.2025**Довідка**

про впровадження результатів дисертаційної роботи Копійка Надії Сергіївни за темою «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками»

Залізобетонні конструкції часто піддаються несприятливому впливу зовнішнього середовища, що призводить до поступового зниження їхньої несучої здатності. Підсилення пошкоджених елементів з використанням сучасних матеріалів, зокрема карбонових стрічок, є одним із найбільш ефективних рішень для відновлення їхньої надійності.

Результати дисертаційного дослідження за темою «Несуча здатність залізобетонних балок з пошкодженнями робочої арматури, підсилених карбоновими стрічками» були впроваджені під час проведення робіт із діагностики та підсилення конструкцій, виконаних ТОВ «Сіка Україна». Отримані наукові напрацювання дозволили оптимізувати підхід до проектування підсилення та підвищити ефективність виконаних робіт.

Керівник Західного відділення
ТОВ «Сіка Україна»


Юрій Собко



ТОВ «СІКА УКРАЇНА»

вул. Миколи Грінченка, 4 · Київ 03038 · Україна
Тел.: +380 44 492 94 19 · www.sika.ua