

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

АЗІЗОВА АННА ГЕННАДІЇВНА

УДК 624.012.35/45:624.072.2+69.059.32

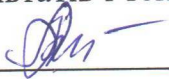
**ДИСЕРТАЦІЯ
МІЦНІСТЬ НА ЗГИН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ
КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЯКІ ПІДСИЛЕНІ ШЛЯХОМ
НАРОЩУВАННЯ ПЕРЕРІЗУ**

192 – Будівництво та цивільна інженерія

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

 / А.Г. Азізова/
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник **Семко Олександр Володимирович, д.т.н., професор**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Полтава – 2026

АНОТАЦІЯ

Азізова А.Г. Міцність на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (19 «Архітектура і будівництво»). – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – Полтава, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню методики розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізів одночасно в стисненій і розтягувальній їх зонах.

У розділі 1 «Аналіз методів підсилення згинальних залізобетонних конструктивних елементів шляхом нарощування перерізу» проведено аналіз способів підсилення залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів перекриттів (покриття) будівель (споруд) та їх конструктивних рішень, які здійснюються шляхом нарощування їх перерізів, сформовані мета і задачі досліджень роботи.

У розділі 2 «Методи розрахунку міцності на згин залізо-бетонних балкових конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу» дана класифікація варіантів способів підсилення (відновлення) балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів, яка була сформована на основі аналізу положень діючої нормативної документації та типових конструктивних рішень, котрі висвітлені в практичних рекомендаціях та наукових дослідженнях науковців світу. Також у розділі приведені методи розрахунку міцності на згин балкових і плитних конструктивних елементів залізобетонних перекриттів, які підсилені шляхом нарощування перерізів, а саме:

- метод розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в

розтягувальній зоні їх перерізу за допомогою додаткових арматурних стержнів, які закріплюються (з'єднуються) до стержнів існуючого армування завдяки переривистих зварних швів. Методика розрахунку міцності на згин залізобетонних балок, які армовані додатковою поздовжньою арматурою під час навантаження, дозволяє визначити: площу раціонального (оптимального) поздовжнього армування їх перерізів; місце (положення) оптимального зварювання арматурних стержнів, які використовуються для посилення перерізів балок у розтягнутій зоні;

- метод розрахунку міцності на згин комбінованих Т-подібних перерізів балкових і плитних елементів залізобетонних перекриттів, які підсилені шляхом улаштування в них додаткового залізобетонного шару набетонування в зоні стиску та додаткового армування в зоні розтягу.. Метод розрахунку забезпечує необхідну міцність у розрахункових комбінованих перерізах балково-плитних елементів монолітного залізобетонного перекриття та перекриттів із збірних залізобетонних ребристих плит чи плоских плит з круглими пустотами при згині, а також дозволяє ефективно розраховувати раціональні перерізи конструктивних компонентів підсилення, враховуючи наявне в них армування;
- методика розрахунку міцності на згин комбінованих залізобетонних балкових елементів, які утворюються в результаті їх підсилення шляхом двобічного симетричного нарощування їх перерізів. Дана методика базується на методі розрахункового опору залізобетону, який ґрунтується на універсальній функціональній залежності $k_z = f(\omega)$ міцносних характеристик залізобетонного конструктивного елементу, що згинається. За допомогою представлених в п.2.4 аналітичних залежностей маємо можливість виконати рішення двох типів задач: задачі типу 1: визначення необхідної площі армування в нижній розтягувальній зоні додаткових бокових бетонних шарів набетонування перерізу в комбінованій балці, яка утворюється в результаті підсилення перерізів існуючої залізобетонної балки шляхом їх нарощуванням по всій висоті додатковим двошаровим симетричним бічним

набетонуванням; задачі типу 2: визначення міцності на згин комбінованої балки, яка утворюється в результаті підсилення перерізів по всій висоті існуючої залізобетонної балки додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням.

У розділі 3 «Міцність та розподіл зусиль зварених внакладку складених поздовжніх арматурних стержнів, які утворюються при підсиленні залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу в розтягненій зоні» приведені результати експериментальних досліджень зварених внакладку окремих поздовжніх арматурних стержнів складеного перерізу з різними конструктивними рішеннями, які утворюються при підсиленні залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу в розтягненій зоні, дозволили визначити вплив різних факторів на їх міцність на розтяг, деформативність та характер розподілу внутрішніх зусиль по їх довжині при дії зовнішнього зусилля, яке моделює стадію позацентрового розтягу робочої арматури в нижній зоні перерізів балкових елементів при згині чи при застосуванні в них попереднього напруження. В результаті експериментальних досліджень були отримані величини коефіцієнтів зниження міцності на розтяг (γ_{sy}) та концентрації напруження ($K_{\sigma y}$) в перерізах арматурних стержнів-зразків поблизу місць обриву та стикування між собою за допомогою зварювання. Отримані величини коефіцієнтів (γ_{sy}) та ($K_{\sigma y}$) необхідно враховувати при розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу за допомогою додаткових арматурних стержнів, які закріплюються (з'єднуються) до стержнів існуючого армування завдяки переривистих зварних швів.

У розділі 4 «Практичні методи розрахунку міцності на згин та проектування конструктивних елементів підсилення залізобетонних балкових конструкцій (елементів) перекриттів будівель і споруд» приведені практичні методи розрахунку і проектування підсилення балкових і плитних конструктивних елементів найбільш поширених залізобетонних міжповерхових перекриттів, які були застосовані при будівництві нині існуючих багатопверхових будівель і

споруд, а саме: перекриття із збірних залізобетонних багатопустотних плит; монолітного балкового залізобетонного перекриття; перекриття із збірних ребристих плит; окремих балкових залізобетонних елементів. Встановлено, що метод підсилення залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів перекриттів шляхом нарощування перерізів одночасно в стисненій і розтягувальній зонах є найбільш раціональним в порівнянні з іншими методами і способами, так як він при мінімальних витратах матеріалів за рахунок збільшення міцності бетону в стисненій зоні і величини відстані (“плеча”) між внутрішніми рівнодійними зусиллями в комбінованому їх перерізі дозволяє значно збільшити їх несучу здатність на згин в перерізах на середині їх прогону, де діють згинальні моменти максимальної величини. Впровадження в проектну практику запропонованих методик з підсилення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів (покриття) шляхом нарощування їх перерізів дозволить ефективно вирішувати конструктивні задачі, пов'язані з їх посиленням під час ремонту, реконструкції чи відновленні будівель та споруд.

Ключові слова: залізобетонні балкові і плитні конструктивні елементи; підсилення шляхом нарощування перерізів; міцність на згин

ABSTRACT

Azizova A.H. Bending Strength of Reinforced Concrete Beam Structural Elements Strengthened by Cross-Section Enlargement. – Qualification scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 192 – Construction and Civil Engineering, Field of Knowledge 19 – Architecture and Construction. – National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic". – Poltava, 2026.

The dissertation is devoted to improving the methodology for calculating the bending strength of reinforced concrete beam elements strengthened by simultaneous enlargement of their cross-sections in both the compression and tension zones.

Chapter 1 "Analysis of methods for strengthening reinforced concrete flexural structural elements by cross-section enlargement" presents an analysis of methods for strengthening reinforced concrete beam and slab floor (roof) structural elements of buildings and structures through cross-section enlargement. Existing structural solutions are reviewed, and the research aim and objectives of the dissertation are formulated.

Chapter 2 "Methods for calculating the bending strength of reinforced concrete beam structural elements strengthened by cross-section enlargement" presents a classification of strengthening (rehabilitation) methods for reinforced concrete beam and slab flexural elements of building and structural floor systems by enlarging their cross-sections. The classification was developed based on an analysis of the provisions of current design standards, typical structural solutions, practical recommendations, and the findings of international research studies. The chapter also presents methods for calculating the bending strength of reinforced concrete beam and slab floor elements strengthened by cross-section enlargement, including:

- A method for calculating the bending strength of reinforced concrete beam elements strengthened by increasing the area of longitudinal reinforcement in the tension zone through the installation of additional reinforcing bars connected to the existing reinforcement by intermittent welded joints. The proposed method for calculating the bending strength of reinforced concrete beams strengthened with additional longitudinal reinforcement under load makes it possible to determine the

required (optimal) area of longitudinal reinforcement in the strengthened cross-section, as well as the optimal location of welded connections between the existing and additional reinforcing bars used to strengthen the tension zone of the beam;

- A method for calculating the bending strength of composite T-shaped cross-sections of reinforced concrete beam and slab floor elements strengthened by casting an additional reinforced concrete overlay in the compression zone and installing additional reinforcement in the tension zone. The proposed method ensures the required bending strength of the composite design cross-sections of beam-and-slab elements in monolithic reinforced concrete floor systems, as well as floor systems composed of precast ribbed reinforced concrete slabs or hollow-core slabs. It also enables the efficient design of rational strengthening components by taking into account the existing reinforcement within the structural elements.
- A method for calculating the bending strength of composite reinforced concrete beam elements formed by strengthening through symmetrical enlargement of their cross-sections on both sides. The proposed method is based on the design resistance approach for reinforced concrete, which employs the universal functional relationship describing the strength characteristics of reinforced concrete flexural members. The analytical relationships presented in section 2.4 make it possible to solve two types of design problems: type 1 – determination of the required area of longitudinal reinforcement in the lower tension zone of the additional side reinforced concrete overlay layers in the composite beam formed by strengthening the existing reinforced concrete beam through full-height symmetrical two-layer side jacketing; type 2 – determination of the bending strength of the composite beam formed by strengthening the full height of the existing reinforced concrete beam with symmetrical two-layer side reinforced concrete jacketing.

Chapter 3 "Strength and stress distribution in lap-welded composite longitudinal reinforcing bars formed during the strengthening of reinforced concrete beam elements by cross-section enlargement in the tension zone" presents the results of an experimental investigation of lap-welded composite longitudinal reinforcing bars with various structural configurations formed during the strengthening of reinforced concrete beam elements by cross-section enlargement in the tension zone. The experimental

studies made it possible to evaluate the influence of different factors on their tensile strength, deformability, and the distribution of internal forces along their length under externally applied loading simulating the stage of eccentric tension in the longitudinal reinforcement located in the lower zone of beam cross-sections subjected to bending or prestressing. As a result of the experimental investigation, the values of the tensile strength reduction coefficient (γ_{sy}) and the stress concentration coefficient ($K_{\sigma y}$) were determined for the cross-sections of reinforcing bar specimens in the vicinity of the termination and lap-welded connection regions. The obtained values of the coefficients (γ_{sy}) and ($K_{\sigma y}$) should be taken into account in the calculation of the bending strength of reinforced concrete beam elements strengthened by increasing the area of longitudinal reinforcement in the tension zone through the installation of additional reinforcing bars connected to the existing reinforcement by intermittent welded joints.

Chapter 4 "Practical methods for calculating the bending strength and designing strengthening components for reinforced concrete beam structures (elements) of building and structural floor systems" presents practical methods for the structural analysis and design of strengthening systems for beam and slab elements of the most common reinforced concrete floor systems used in the construction of existing multi-storey buildings and structures. The proposed methods are applicable to the strengthening of floor systems composed of precast hollow-core reinforced concrete slabs, monolithic reinforced concrete beam-and-slab floor systems, precast ribbed reinforced concrete slabs, and individual reinforced concrete beam elements. It has been established that strengthening reinforced concrete beam and slab floor elements by simultaneous enlargement of their cross-sections in both the compression and tension zones is the most rational method compared with other strengthening techniques. Owing to the increased compressive capacity of the concrete in the compression zone and the increased lever arm between the internal resultant forces in the composite cross-section, this method provides a significant increase in the flexural load-carrying capacity of the strengthened elements at midspan, where the maximum bending moments occur, while requiring only a minimum additional amount of strengthening materials.

Keywords: reinforced concrete beam elements; reinforced concrete slab elements; structural strengthening; cross-section enlargement; bending strength.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧКИ, В ЯКИХ НАВЕДЕНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

**Публікації у наукових періодичних виданнях, включених до категорії
“Б” Переліку наукових фахових видань України:**

1. Азізова, А.Г., Овсій, О.М., Овсій, Д.М., Стрюк Р.І. (2025). Підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні. *Нові технології в будівництві: Науково-технічний журнал*. №46 // Київ, НДІБВ. – 2025. – С. 3-15. <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2025.46.1>

(Особистий внесок: запропоновано методичні основи розрахунку міцності на згин і проектування підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки)

2. Азізова, А.Г., Пенц, М.В., Овсій, Д.М., Гасенко, А.В. (2025). Конструктивні рішення з відновлення вбудованих приміщень споруд подвійного призначення в будівлях закладів освіти із стіновою конструктивною системою. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 20-39. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-02)

(Особистий внесок: запропонована класифікація варіантів способів підсилення (відновлення) балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів)

3. Azizova, A., Ovsii, D., Semko, O., & Ovsii, M. (2025). Strength and force distribution of lap-welded composite longitudinal reinforcing bars formed during strengthening of reinforced concrete beam elements by increasing the cross-section in the tension zone. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(64), 39–54. <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4136>

(Особистий внесок: наведені результати експериментальних досліджень зразків із зварених внакладку окремих поздовжніх арматурних стержнів складеного перерізу з різними конструктивними рішеннями, які утворюються

при підсиленні залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу в розтягненій зоні, які дозволили визначити вплив різних факторів на їх міцність на розтяг, деформативність та характер розподілу внутрішніх зусиль по їх довжині при дії зовнішнього зусилля, яке моделює стадію позацентрового розтягу робочої арматури в нижній зоні перерізів балкових елементів при згині чи при застосуванні в них попереднього напруження)

4. Azizova A., & Ovsii D. (2026). Methods of strengthening and repairing reinforced concrete beam and slab elements by increasing their cross-sections: a review and directions for further scientific research. *Academic Journal. Industrial Machine, Building Civil Engineering*, 1(66), 19-34. <https://doi.org/10.26906/znp.2026.66.4667> *(Особистий внесок: проведено аналіз наукових досліджень та нормативної документації, які присвячені підсиленню залізобетонних балкових і плитних елементів, на основі якого були сформовані мета і задачі наукових досліджень, що були проведені в дисертаційній роботі)*

Публікації у зарубіжних наукових іноземних виданнях, які проіндексовані у НМБД Scopus:

5. Galinska T., Azizova A., Ovsii D., Ovsii O. and Striuk R. (2026) Calculation of bending strength of RC beams reinforced with added longitudinal reinforcement under loading conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. 3251 012048 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3251/1/012048>

(Особистий внесок: запропоновано методичні основи розрахунку міцності на згин і проектування підсилення збірних залізобетонних балок шляхом нарощування перерізу в розтягненій зоні за допомогою додаткових арматурних стержнів, які локально з'єднуються зварними переривистими швами з існуючими поздовжніми арматурними стержнями при дії експлуатаційного навантаження)

6. Azizov, T., Azizova, A., Al Ghadban, S. (2018): Construction and calculation of reinforced concrete overlap with a high spatial work effect. *Int. J. Eng. Technol.* 7(3.2), 567. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14591>

(Особистий внесок: наведено методику визначення зусилля між полицею та ребрами балки збірного монолітного залізобетонного перекриття під час її згину, яка базується на теорії складних стрижнів. Запропонований в статті

методичний підхід був використаний в дисертаційній роботі при розробці методики визначення зусилля зсуву, яке виникає вздовж площини стикування додаткового залізобетонного шару набетонування з верхньою площиною залізобетонної балкового конструктивного елементу перекриття залежно від випадку напружено-деформованого стану в його розрахунковому комбінованому перерізі при згині)

7. Kochkarev, D., Azizov, T., Azizova, A., Galinska, T. (2021): Designing of standard cross sections of composite bending reinforced concrete elements by the method of design resistance of reinforced concrete. In: Blikharsky, Z. (ed.) *Proceedings of EcoComfort 2020*, pp. 202–211. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_25

(Особистий внесок: запропоновано метод розрахунку комбінованих згинальних елементів на основі методу розрахункових опорів залізобетону, який був використаний при розробці методики розрахунку та проектування стандартних поперечних комбінованих перерізів згинальних залізобетонних елементів, які утворюються при їх підсиленні)

8. Rizak, V., Kochkarev, D., Azizova, A., Galinska, T. (2023). Approximation Models of the Method of Design Resistance of Reinforced Concrete for Bending Elements with Double and Multirow Reinforcement. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 299, pp. 285-292. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_23

(Особистий внесок: запропоновано апроксимаційні поліноміальні та лінійні моделі методу розрахункового опору залізобетону для розрахунку нормальних перерізів залізобетонних згинальних елементів з подвійним та багаторядним армуванням, які розроблені на основі методу розрахункового опору залізобетону, котрий базується на прийнятті гіпотези Бернуллі та використанні екстремального критерію для визначення несучої здатності на основі нелінійної деформаційної моделі розрахунку та діаграм деформації бетону. Запропоновані апроксимаційні формули дозволили значно спростити розрахунок несучої здатності та площі робочої арматури нормальних

комбінованих перерізів залізобетонних згинальних елементів з подвійним та багаторядним армуванням, які утворюються при їх підсиленні)

9. Kochkarev, D., Kosior-Kazberuk, M., Azizova, A., Pavlikov, A., Galinska, T. (2023): Calculation of overreinforced concrete bending elements based on modern models for deformation of materials. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds.) *Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 299, pp. 335–345. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_27

(Особистий внесок: викладені моделі і методи розрахунку: нелінійна модель деформації з екстремальним критерієм; нелінійна модель деформації з постійними граничними значеннями деформацій стиснутого бетону; метод розрахункового опору залізобетону; інженерні методи на основі спрощених діаграм деформації, які були використані при розробці методики розрахунку та проектування стандартних поперечних композитних перерізів згинальних залізобетонних елементів, які утворюються при їх підсиленні)

Публікації за результатами апробації матеріалів дисертації на конференціях:

10. Азізова, А.Г., Овсій, Д.М. (2024, 14-23 травня). Підсилення залізобетонних балок шляхом нарощування перерізу розтягнутої зони. *Зб. матеріалів 76-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів університету*. Том 1. Полтава: НУПП, 194-195.
11. Азізова А.Г. (2024, 06 листопада). Застосування екологічного бетону і розчину при ремонті і підсиленні бетонних і залізобетонних конструкцій шляхом нарощування перерізу. *Зб. тез міжн. наук.-практ. конф. студ., асп. та молодих вчених: Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики*. Полтава: НУПП, 287-289.
12. Азізова, А.Г., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. (2024, 20-22 листопада). Аналіз факторів впливу на напружено-деформований стан залізобетонний балок, які підсилені шляхом нарощування поздовжньої арматури. *Зб. тез доповідей 10-ї міжн. наук.-техн. конф.: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті*. Харків:

УкрДУЗТ, 138-140. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/28247>

13. Азізова, А.Г., Овсій, О.М., Овсій, Д.М. (2025) Удосконалення методики проектування залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу одночасно в стиснутій та розтягнутій зонах. *Новітні тенденції розвитку міського будівництва та господарства: тези доповідей V-ї Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції* (23-25 квітня 2025 року, м. Рівне). Том 2. Рівне: НУВГП, 2025. – С. 49-50.
14. Азізова, А.Г., Овсій, Д.М. (2025) Міцність на згин залізобетонних балок монолітного перекриття, які підсилені шляхом нарощування перерізу одночасно в стиснутій та розтягнутій зонах додатковими залізобетонним шаром та армуванням. *Зб. матеріалів 77-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів університету* (16-22 травня 2025 року, м. Полтава). Том 1. Полтава: НУПП, 2025.- С. 137-139.
15. Азізова, А.Г. (2025) Ремонт і підсилення бетонних і залізобетонних конструкцій за допомогою екологічного бетону і розчину. *Матеріали IV-ї Міжнародної науково--практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»)* (13-14 травня 2025 року, м. Київ). Київ: КНУБА, 2025, 10-11.
16. Азізова, А.Г., Стрюк Р.І., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. (2025) Підсилення збірних залізобетонних круглопорожнистих плит перекриття при переобладнанні підвальних приміщень існуючих цивільних будівель в приміщення подвійного призначення. *Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції: робоча програма та тези доповідей V-ї Міжнародної наук.-практ. конф.* (14-16 травня 2025 року, м. Київ). Київ: КНУБА, 2025.- С.128-129.
17. Азізова, А.Г., Стрюк Р.І., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. (2025) Розрахунок конструктивних компонентів при підсиленні залізобетонних балкових елементів одночасно в стиснутій і розтягнутій зонах перерізу. *Актуальні проблеми інженерної механіки: тези доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф.* (21-23 травня 2025 року, м. Одеса)./ за заг. ред. М. Г. Сур'янінова. - Одеса: ОДАБА, 2025.- С.19-23.
18. Река, А.В., Азізова, А.Г., Овсій, Д.М., Овсій, О.М.(2025) Підвищення

- міцності на згин металевих балок під навантаженням шляхом їх підсилення додатковими сталевими елементами чи арматурними стержнями. *Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини"* (12-14 червня 2025 року, м. Одеса).
19. Азізова А.Г. (2025) Класифікація варіантів підсилення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів будівель шляхом нарощування їх перерізів. *Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики // Збірник тез за матеріалами II Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, 07 листопада 2025 року. – Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2025. – С. 200-202.
 20. Азізова А.Г., Семко О.В. (2025) Вплив конструктивних факторів на міцність при згині і зрізі залізобетонних прогонних елементів, посиленних додатковим шаром із фібробетону (UHPFRC): огляд публікацій/ *Академічна й університетська наука: результати та перспективи : зб. наук. пр. XVIII Міжнар. наук.-практ. конф.*, 09–12 грудня 2025 р. – Полтава: Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2025.– С. 218–221. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/21012>
 21. Стрюк Р.І., Азізова А.Г., Овсій Д.М., Гасенко А.В. (2026) Конструктивні рішення будівель і споруд швидкого зведення із збірно-монолітного залізобетону для об'єктів критичної інфраструктури із захисними властивостями укриття II-го типу. *Тези доповідей VI-ї Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції "Новітні тенденції розвитку міського будівництва та господарства"* (22-24 квітня 2026 року, м. Рівне), у 2-х томах. Том 1. Секція 1. Реконструкція об'єктів будівництва. [Електронне видання]. - Рівне: НУВГП, 2026. – С. 72-73.
 22. Стрюк, Р.І., Азізова, А.Г., Овсій, Д.М. (2026) Визначення зусилля зсуву між бетонними компонентами у двошарових залізобетонних елементах залежно від випадку граничного напружено-деформованого стану в їх розрахунковому перерізі при згині. *Зб. матеріалів 78-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів університету* (15-22 травня 2026 року, м. Полтава). Том 2. Полтава: НУПП, 2026. – С. 166-169.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДСИЛЕННЯ ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ШЛЯХОМ НАРОЩУВАННЯ ПЕРЕРІЗУ.....	16
1.1 Застосування методів підсилення балкових і плитних залізобетонних конструктивних елементів шляхом нарощування їх перерізів в практиці будівництва та реконструкції будівель і споруд.....	16
1.2 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин балкових залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу	22
1.3 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин плитних залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу.....	61
1.4 Висновки за першим розділом та формування мети і завдань досліджень.....	67
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ НА ЗГИН ЗАЛІЗО- БЕТОННИХ БАЛКОВИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЯКІ ПІДСИЛЕНІ ШЛЯХОМ НАРОЩУВАННЯ ПЕРЕРІЗУ.....	72
2.1 Класифікація варіантів способів підсилення залізобетонних балкових конструктивних елементів шляхом нарощування їх перерізів.....	72
2.2 Метод розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу.....	77
2.3 Метод розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізів одночасно в стисненій і розтягувальній їх зонах.....	87
2.4 Методика розрахунку та проектування стандартних поперечних перерізів композитних згинальних залізобетонних елементів методом розрахункового опору залізобетону, які утворюються при їх підсиленні...	104
2.5 Висновки за другим розділом по теоретичним розробкам.....	112

РОЗДІЛ 3 МІЦНІСТЬ ТА РОЗПОДІЛ ЗУСИЛЬ ЗВАРЕНИХ ВНАКЛАДКУ СКЛАДЕНИХ ПОЗДОВЖНИХ АРМАТУРНИХ СТЕРЖНІВ, ЯКІ УТВОРЮЮТЬСЯ ПРИ ПІДСИЛЕННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ШЛЯХОМ НАРОЩУВАННЯ ПЕРЕРІЗУ В РОЗТЯГНЕНІЙ ЗОНІ.....	114
3.1 Задачі і методика проведення експериментальних досліджень.....	114
3.2 Результати проведення експериментальних досліджень.....	126
3.3 Висновки за третім розділом.....	135
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ НА ЗГИН ТА ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ (ЕЛЕМЕНТІВ) ПЕРЕКРИТТІВ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	137
4.1 Розрахунок міцності на згин і проектування підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки.....	137
4.2 Розрахунки міцності на згин комбінованих згинальних залізобетонних елементів, які утворюються в результаті підсилення перерізів існуючої залізобетонних конструктивних елементів шляхом нарощування додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням шляхом збільшення її поперечних перерізів в стиснутій та розтягнутій зонах.....	155
4.3 Розрахунок міцності на згин і проектування конструктивних елементів підсилення залізобетонних балкових елементів монолітного перекриття шляхом збільшення їх поперечного перерізу в стиснутій та розтягнутій зонах.....	158
4.4 Розрахунок міцності на згин і проектування конструктивних елементів підсилення збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття шляхом збільшення її поперечних перерізів в стиснутій та розтягнутій зонах.....	178

4.5 Розрахунок міцності на згин і проектування конструктивних елементів підсилення залізобетонної балки перекриття шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні її перерізу.....	190
4.6 Висновок за четвертим розділом по результатам впровадження практичних методів з проектування конструктивних елементів підсилення балкових залізобетонних елементів перекриттів шляхом нарощування їх перерізів.....	195
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	196
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	200
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	217
ДОДАТОК Б Довідки про впровадження результатів дисертації.....	224

ВСТУП

Актуальність роботи. Зміна функціонального призначення існуючих будівель і споруд потребує проведення реконструкції, ревіталізації їх приміщень, яке пов'язане з необхідністю виконання комплексу об'ємно-планувальних, конструктивних і організаційних ремонтних заходів. Одним із ремонтних заходів є підсилення залізобетонних перекриттів, балкові і плитні конструктивні елементи яких мають недостатню несучу здатність у зв'язку із збільшенням величини сумарного навантаження на перекриття чи значним фізичним зносом за період довготривалої їх експлуатації або внаслідок впливу позанормованих ударно-динамічних навантажень вибухового характеру.

Згідно положень пп. 6.4.1, 6.4.2 діючих норм ДБН Б В.3.1-2:2016 підсилення залізобетонних балкових і плитних прогінних елементів при недостатній їх несучій здатності чи послабленні виконується шляхом: збільшення перерізу за допомогою улаштування в стисненій, розтягненій зонах і з боків в зоні зрізу додаткового залізобетонного шару нарощування, або залізобетонної «сорочки», які армують поздовжніми і похилими у вигляді відгинів стержнями (дивись рисунок 1); збільшення перерізу вихідного конструктивного залізобетонного елемента за допомогою допоміжних сталевих елементів із прокатних профілів і листової полоси, які встановлюються (підводяться) з боків чи у стиснутій і розтягненій зонах перерізів з улаштуванням попереднього напруження чи без нього; збільшення перерізу балкових і плитних елементів перекриття за допомогою листів із полімерного матеріалу (FRP) різних товщин з додатковим армуванням волокнами, такими як скловолокно, вуглецеве волокно або арамідні волокна.

При підсиленні балкових і плитних елементів залізобетонного перекриття виробничих і цивільних будівель і споруд з повним чи неповним несучим каркасом, виникають ряд труднощів, які безпосередньо пов'язані з їх конструктивним вирішенням та улаштуванням, а саме:

- необхідність додаткових заходів для забезпечення спільної взаємодії (роботи) між елементами нової конструкції підсилення та вихідним балковим чи плитним конструктивним елементом перекриття;

- урахування конструктивних особливостей елементів перекриття: вихідних розмірів; рівня армування їх перерізів; характеристик матеріалів їх компонентів;
- урахування напружено-деформованого стану вихідного балкового чи плитного елементу перекриття і конструктивних елементів підсилення в момент здійснення будівельних і ремонтних робіт.

Тому, необхідно розробити нові конструктивні рішення з підсилення залізобетонних балкових елементів перекриття існуючих будівель і споруд, які будуть ефективні з технологічної і економічної точки зору.

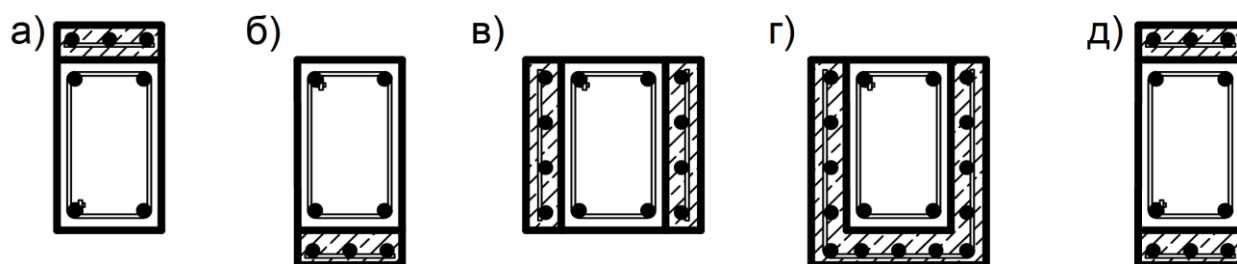


Рис. В.1 Варіанти підсилення перерізу балкового залізобетонного елементу шляхом нарощування його перерізу додатковим залізобетонним шаром збоку однієї, двох чи трьох його граней: а) тільки збоку верхньої грані (стисненої зони перерізу); б) тільки збоку нижньої грані (розтягнутої зони перерізу); в) тільки збоку бічних граней перерізу; г) одночасно збоку трьох граней перерізу: нижньої і двох бічних; д) одночасно відносно верхньої і нижньої граней перерізу (в стиснутій і розтягнутій зонах)

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає напряму науково-технічної політики держави в галузі оцінювання технічного стану будівель і споруд згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №409 від 5 травня 1997 р. “Про забезпечення надійності будівель, споруд та мереж”. Робота виконувалась у рамках наукової програми дослідних тем національного університету “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” та кафедри будівництва та цивільної інженерії «Енергоефективні конструктивні рішення елементів будівель», (державний реєстраційний номер 0121U109497, термін виконання у 2021-2022 рр., керівник – д.т.н., професор Семко О.В.) та держбюджетної теми “Ресурсоощадні технології прискореного відновлення пошкоджених будівель із влаштуванням захисних споруд цивільного захисту», (шифр наукової роботи №109/25; державний

реєстраційний номер: 0125U000895, термін виконання 2025-2026 рр., керівник – д.т.н., професор Гасенко А.В.).

Метою роботи є удосконалення теоретичних методів розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу, з урахуванням граничного напружено-деформованого стану їх компонентів та розробка типових рішень щодо їх запровадження в практику проектування.

Для досягнення мети були сформульовані та вирішені такі **основні завдання дослідження**:

- провести аналіз методів розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, переріз яких нарощується шляхом збільшення площі з різних його боків (сторін) під час підсилення існуючих конструктивних елементів перекриттів;
- провести аналіз результатів експериментальних досліджень міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилюються шляхом нарощування їх перерізів, які були проведені науковцями світу;
- удосконалити методику розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсилюються шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу за допомогою додаткових арматурних стержнів, які закріплюються (з'єднуються) до стержнів існуючого армування завдяки переривистих зварних швів;
- розробити методику розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів, які підсилюються шляхом нарощування перерізів з одночасним улаштуванням в них додаткового залізобетонного шару набетонування в зоні стиску та додаткового армування в зоні розтягу, в якій би враховувалися наявне армування їх перерізів та стадії граничного напружено-деформованого стану їх компонентів в момент руйнування;
- експериментально дослідити вплив різних факторів на міцність при розтягуванні та деформативність зварених внакладку окремих поздовжніх

арматурних стержнів складеного перерізу з різними конструктивними рішеннями, які утворюються при підсиленні залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу в розтягненій зоні, при дії на них зовнішнього зусилля, яке моделює стадію позацентрового розтягу робочої арматури в нижній зоні перерізів балкових елементів при згині чи при застосуванні в них попереднього напруження;

- результати досліджень впровадити у практику проектування і будівництва шляхом розроблення практичних методів розрахунку міцності на згин та проектування конструктивних елементів підсилення плитних і балкових залізобетонних конструкцій (елементів) перекриттів будівель і споруд.

Об’єкт дослідження – залізобетонні балкові елементи перекриттів будівель і споруд, які підсилюються шляхом нарощування площі перерізів в стиснутій та розтягнутій їх зонах.

Предмет дослідження – міцність на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування їх перерізів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- *дістав подальшого розвитку* аналіз існуючих методів підсилення згинальних залізобетонних конструктивних елементів шляхом нарощування перерізу: автором запропонована загальна класифікація існуючих способів підсилення залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування їх перерізів;
- *вперше* запропонований методичний підхід з розрахунку міцності на згин та проектування оптимальної площі армування залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу одночасно в стисненій і розтягувальній їх зонах;
- *удосконалена* методика розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу;
- *набули подальшого розвитку* практичні методики розрахунку міцності на згин та проектування конструктивних елементів підсилення залізобетонних конструкцій (елементів) перекриття будівель і споруд, а саме: підсилення

залізобетонних балок перекриття шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні її перерізу; підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки; підсилення залізобетонних балкових елементів монолітного перекриття шляхом збільшення їх поперечного перерізу в стиснутій та розтягнутій зонах; підсилення збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття шляхом збільшення її поперечних перерізів в стиснутій та розтягнутій зонах.

Методи дослідження: методи порівняльного аналізу при підборі, вивчені й аналізі літературних джерел; загальні методи будівельної механіки для теоретичних досліджень; методи математичної статистики при порівняльному аналізі отриманих теоретичних і експериментальних даних.

Достовірність та обґрунтованість результатів забезпечено: використанням під час теоретичних досліджень фундаментальних закономірностей будівельної механіки, опору матеріалів, методів розрахунку міцності на згин посиленних перерізів залізобетонних балкових елементів з урахуванням граничних станів їх компонентів в момент руйнування; співставленням отриманих теоретичних розробок з результатами експериментальних досліджень науковців світу, у тому числі закордонних, а також статистичною обробкою отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в можливості використання запропонованих методик розрахунку міцності на згин балкових чи плитних залізобетонних елементів, що підсилені шляхом нарощування перерізів, в практиці проектування та у навчальному процесі. Запропоновані практичні інженерні методики розрахунку і проектування конструктивних елементів підсилення залізобетонних балкових конструкцій (елементів) перекриттів дозволяють розробити типові рішення, які можуть бути широко використані при будівництві нових та реконструкції і відновленні існуючих будівель і споруд.

Апробація результатів. Головні положення і результати дисертації доповідались на 13-ти міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях:

- 76-й, 77-й та 78-й наукових конференціях професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів національного університету “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” (м. Полтава, НУПП імені Юрія Кондратюка, 14-23 травня 2024 року, 16-22 травня 2025 року та 15-22 травня 2026 року);
- Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики” (м. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 06 листопада 2024 року);
- 10-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті” (м. Харків: УкрДУЗТ, 20-22 листопада 2024 року);
- V-й і VI-й Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції “Новітні тенденції розвитку міського будівництва та господарства” (м. Рівне, НУВГП, 23-25 квітня 2025 року та 22-24 квітня 2026 року);
- IV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Green Construction» («Зелене будівництво») (м. Київ, КНУБА, 13-14 травня 2025 року);
- V-й Міжнародній науково-практичній конференції “Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції” (м. Київ, КНУБА, 14-16 травня 2025 року);
- XI-й Міжнародній науково-технічній конференції “Актуальні проблеми інженерної механіки” (м. Одеса, ОДАБА, 21-23 травня 2025 року);
- Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини» (м. Одеса, ОДАБА, 12-14 червня 2025 року);
- II Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (м. Полтава, НУПП імені Юрія Кондратюка, 07 листопада 2025 року);
- XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (м. Полтава, НУПП, 09 - 12 грудня 2025 року).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 22-и наукових працях, у тому числі 4-и статті у фахових виданнях України, 5-ть статті – у зарубіжних виданнях інших держав, які проіндексовані НМБД Scopus, та у 13-и друкованих тезах за матеріалами наукових конференцій:

1. Azizov, T., Azizova, A., Al Ghadban, S.: Construction and calculation of reinforced concrete overlap with a high spatial work effect. *Int. J. Eng. Technol.* 7(3.2), 567 (2018). <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14591>

2. Kochkarev, D., Azizov, T., Azizova, A., Galinska, T.: Designing of standard cross sections of composite bending reinforced concrete elements by the method of design resistance of reinforced concrete. In: Blikharsky, Z. (ed.) *Proceedings of EcoComfort 2020*, pp. 202–211. Springer International Publishing, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_25

3. Rizak, V., Kochkarev, D., Azizova, A., Galinska, T. (2023). Approximation Models of the Method of Design Resistance of Reinforced Concrete for Bending Elements with Double and Multirow Reinforcement. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 299, pp. 285-292. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_23

4. Kochkarev, D., Kosior-Kazberuk, M., Azizova, A., Pavlikov, A., Galinska, T.: Designing of standard cross sections of composite bending reinforced concrete elements by the method of design resistance of reinforced concrete. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds.) *Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 299, pp. 335–345. Springer International Publishing, Cham (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_27

5. Азізова, А.Г., Овсій, О.М., Овсій, Д.М., Стрюк Р.І. (2025). Підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні. *Нові технології в будівництві: Науково-технічний журнал*. №46 // Київ,

НДІБВ. – 2025. – С. 3-15. <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2025.46.1>

6. Азізова, А. Г., Пенц, М. В., Овсій, Д. М., Гасенко, А. В. (2025). Конструктивні рішення з відновлення вбудованих приміщень споруд подвійного призначення в будівлях закладів освіти із стіновою конструктивною системою. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 20-39. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-02)

7. Azizova, A., Ovsii, D., Semko, O., & Ovsii, M. (2025). Strength and force distribution of lap-welded composite longitudinal reinforcing bars formed during strengthening of reinforced concrete beam elements by increasing the cross-section in the tension zone. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(64), 39–54. <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4136>

8. Galinska T., Azizova A., Ovsii D., Ovsii O. and Striuk R. (2026) Calculation of bending strength of RC beams reinforced with added longitudinal reinforcement under loading conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. 3251. 012048 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3251/1/012048>

9. Azizova A., & Ovsii D. (2026). Methods of strengthening and repairing reinforced concrete beam and slab elements by increasing their cross-sections: a review and directions for further scientific research. *Academic Journal. Industrial Machine, Building Civil Engineering*, 1(66), 19-34. <https://doi.org/10.26906/znp.2026.66.4667>

10. Азізова А.Г. Підсилення залізобетонних балок шляхом нарощування перерізу розтягнутої зони / А.Г. Азізова, Д.М. Овсій // *Тези в збірнику матеріалів 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету* (Полтава, 14 травня – 23 травня 2024 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2024. – Т. 1. – С. 194–195. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/16298>

11. Азізова А.Г. (2024, 06 листопада). Застосування екологічного бетону і розчину при ремонті і підсиленні бетонних і залізобетонних конструкцій шляхом нарощування перерізу. *Зб. тез міжн. наук.-практ. конф. студ., асп. та молодих вчених: Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики*. Полтава: НУПП, 287-289.

12. Азізова, А.Г., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. (2024, 20-22 листопада). Аналіз факторів впливу на напружено-деформований стан залізобетонний балок, які підсилені шляхом нарощування поздовжньої арматури. *Зб. тез доповідей 10-ї міжн. наук.-техн. конф.: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті*. Харків: УкрДУЗТ, 138-140. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/28247>

13. Азізова, А.Г., Овсій, О.М., Овсій, Д.М. (2025) Удосконалення методики проектування залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу одночасно в стиснутій та розтягнутій зонах. *Новітні тенденції розвитку міського будівництва та господарства: тези доповідей V-ї Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції (23-25 квітня 2025 року, м. Рівне)*. Том 2. Рівне: НУВГП, 2025. – С. 49-50.

14. Азізова, А.Г., Овсій, Д.М. (2025) Міцність на згин залізобетонних балок монолітного перекриття, які підсилені шляхом нарощування перерізу одночасно в стиснутій та розтягнутій зонах додатковими залізобетонним шаром та армуванням. *Зб. матеріалів 77-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів університету (16-22 травня 2025 року, м. Полтава)*. Том 1. Полтава: НУПП, 2025. – С. 137-139.

15. Азізова, А.Г. (2025) Ремонт і підсилення бетонних і залізобетонних конструкцій за допомогою екологічного бетону і розчину. *Матеріали IV-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»)* (13-14 травня 2025 року, м. Київ). Київ: КНУБА, 2025, 10-11.

16. Азізова, А.Г., Стрюк Р.І., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. (2025) Підсилення збірних залізобетонних круглопорожнистих плит перекриття при переобладнанні підвальних приміщень існуючих цивільних будівель в приміщення подвійного призначення. *Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції: робоча програма та тези доповідей V-ї Міжнародної наук.-практ. конф.* (14-16 травня 2025 року, м. Київ). Київ: КНУБА, 2025.- С.128-129.

17. Азізова, А.Г., Стрюк Р.І., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. (2025) Розрахунок конструктивних компонентів при підсиленні залізобетонних балкових елементів

одночасно в стиснутій і розтягнутій зонах перерізу. *Актуальні проблеми інженерної механіки: тези доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф.* (21-23 травня 2025 року, м. Одеса)./ за заг. ред. М. Г. Сур'янінова. - Одеса: ОДАБА, 2025.- С.19-23.

18. Река, А.В., Азізова, А.Г., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. (2025) Підвищення міцності на згин металевих балок під навантаженням шляхом їх підсилення додатковими сталевими елементами чи арматурними стержнями. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини: тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції* (12-14 червня 2025 року, м. Одеса). – Одеса: ОДАБА, 2025. – С.57-58.

19. Азізова А.Г. (2025) Класифікація варіантів підсилення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів будівель шляхом нарощування їх перерізів. *Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики // Збірник тез за матеріалами II Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 07 листопада 2025 року.* – Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2025. – С. 200-202.

20. Азізова А.Г. Семко О.В. (2025) Вплив конструктивних факторів на міцність при згині і зрізі залізобетонних прогонних елементів, посилені додатковим шаром із фібробетону (UHPFRC): огляд публікацій/ *Академічна й університетська наука: результати та перспективи : зб. наук. пр. XVIII Міжнар. наук.-практ. конф., 09–12 грудня 2025 р.* – Полтава: Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2025.– С. 218–221. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/21012>

21. Стрюк Р.І., Азізова А.Г., Овсій Д.М., Гасенко А.В. (2025) Конструктивні рішення будівель і споруд швидкого зведення із збірно-монолітного залізобетону для об'єктів критичної інфраструктури із захисними властивостями укриття II-го типу. *Тези доповідей VI-ї Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції “Новітні тенденції розвитку міського будівництва та господарства”* (22-24 квітня 2026 року, м. Рівне), у 2-х томах. Том 1. Секція 1. Реконструкція об'єктів будівництва. [Електронне видання]. - Рівне: НУВГП, 2026. – С. 72-73.

22. Стрюк, Р.І., Азізова, А.Г., Овсій, Д.М. (2026) Визначення зусилля зсуву

між бетонними компонентами у двошарових залізобетонних елементах залежно від випадку граничного напружено-деформованого стану в їх розрахунковому перерізі при згині. *Зб. матеріалів 78-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів університету (15-22 травня 2026 року, м. Полтава). Том 2. Полтава: НУПП, 2026. – С. 166-169.*

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Робота викладена на 228 сторінках машинописного тексту, з яких 168 сторінок основного тексту, що включають 49 рисунків і 12 таблиць, 16 сторінок списку використаних джерел із 164 назв та 11 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДСИЛЕННЯ ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ШЛЯХОМ НАРОЩУВАННЯ ЇХ ПЕРЕРІЗУ

1.1 Застосування методів підсилення згинальних залізобетонних конструктивних елементів шляхом нарощування перерізу у практиці будівництва, реконструкції будівель і споруд.

Зміцнення залізобетонних (ЗБ) конструкцій зростає в усьому світі і в Україні через збільшення зносу багатьох існуючих ЗБ конструкцій та їх руйнування внаслідок довготривалої експлуатації та впливу позанормованих ударно-динамічних навантажень вибухового характеру, а також при проведенні реконструкції, ревіталізації існуючих будівель і споруд при зміні функціонального призначення їх приміщень. Зміцнення ЗБ конструкцій залежно від ступеня їх фізичного зносу, руйнування чи недостатньої несучої спроможності може здійснюватися шляхом їх розвантаження або збільшення чи відновлення їх несучої здатності. Вибір відповідного методу зміцнення ЗБ конструкції залежить від різних організаційно-технологічних та конструктивних факторів, які безпосередньо впливають на проведення відновлювальних ремонтних чи будівельних робіт. Метод збільшення несучої здатності при зміцненні ЗБ конструкцій застосовується у випадках, коли методи розвантаження чи відновлення їх несучої здатності є недостатніми згідно конструктивних вимог та економічно і технологічно неефективними.

У більшості наукових публікацій, практичних рекомендаціях і положень п. 6.3.4,б нормативних документів ДБН Б В.3.1-2:2016 [1] способи підсилення при збільшенні несучої здатності балкових і плитних ЗБ конструкцій поділяють на три основні групи (дивись загальну класифікацію способів підсилення на рис. 1.1):

- І-а група – способи підсилення, які здійснюються без зміни розрахункової схеми ЗБ конструкції шляхом: підсилення розтягнутої та стиснутої зон, зони зрізу їх перерізів; підсилення конструкцій при дії крутного моменту або при місцевому зминанні, відриві і продавлюванні;

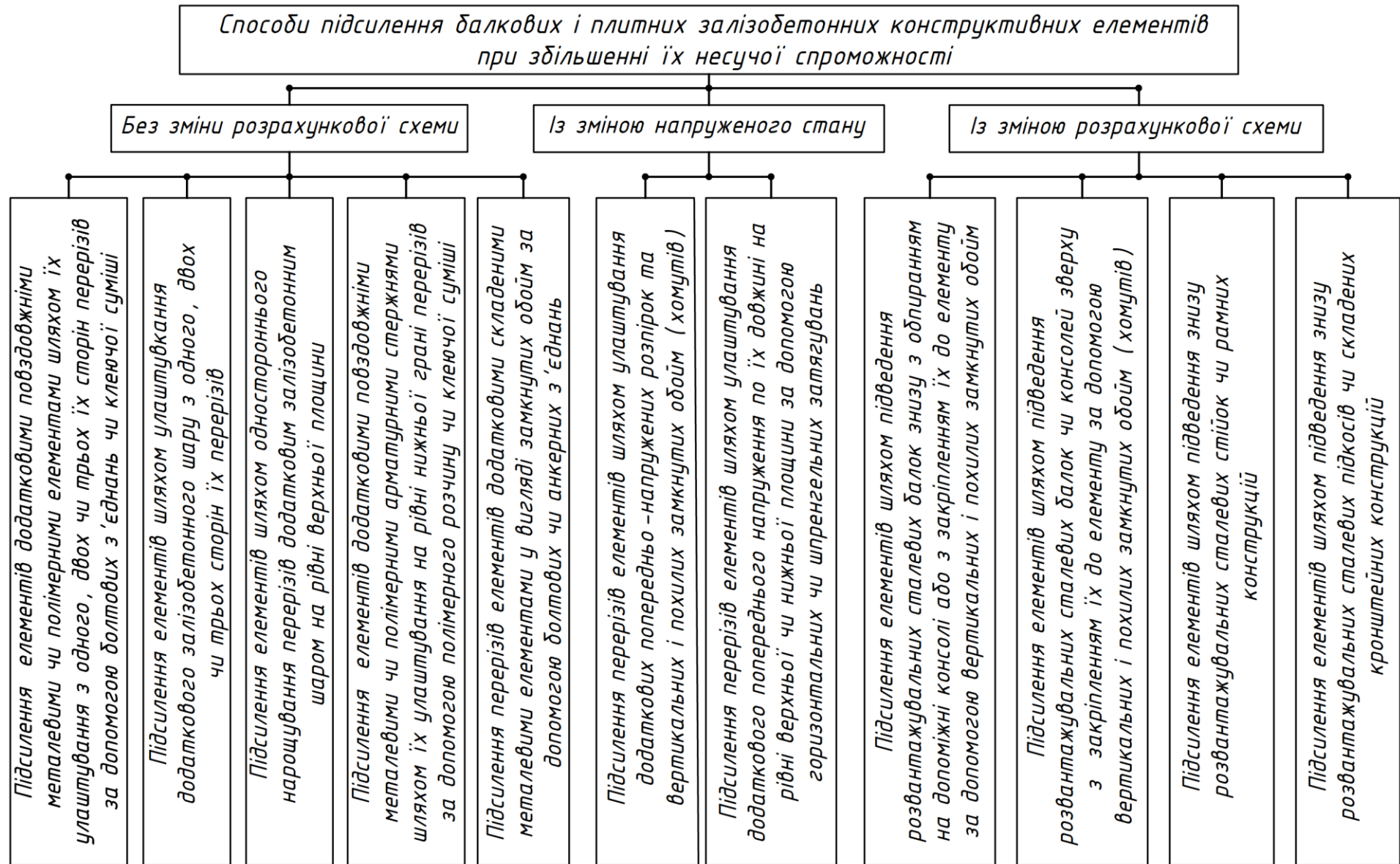


Рис. 1.1 Загальна класифікація способів підсилення балкових і плитних залізобетонних конструктивних елементів перекриттів (покриття) будівель і споруд

- II-а група – способи підсилення, які здійснюються із зміною конструктивної схеми ЗБ конструкції шляхом: зміни місця передачі навантаження на конструкцію; підвищення ступеня зовнішньої статичної невизначеності за допомогою введення додаткових в'язей, що забезпечують нерозрізність і просторову роботу конструкції, що підсилюється;
- III-я група – способи підсилення із зміною напруженого стану ЗБ конструкції за рахунок влаштування додаткових зтяжок, розпірок, шпренгелів, шарнірно-стрижневих ланцюгів.

Згідно положень пп. 6.4.1, 6.4.2 діючих норм ДБН Б В.3.1-2:2016 [1] підсилення залізобетонних балкових і плитних прогінних елементів при недостатній їх несучій здатності чи послабленні виконується шляхом: збільшення перерізу за допомогою улаштування в стисненій, розтягненій зонах і з боків в зоні зрізу додаткового залізобетонного шару нарощування, або залізобетонної «сорочки», які армують поздовжніми і похилими у вигляді відгинів стержнями (дивись рис. 1.2, а-в); збільшення перерізу вихідного конструктивного залізобетонного елементу за допомогою допоміжних сталєвих елементів із прокатних профілів і листової полоси, які встановлюються (підводяться) з боків чи у стиснутій і розтягненій зонах перерізів з улаштуванням попереднього напруження чи без нього (дивись фото на рис. 1.2,а,б,в); збільшення перерізу балкових і плитних елементів перекриття за допомогою листів із полімерного матеріалу (FRP) різних товщин з додатковим армуванням волокнами, такими як скловолокно, вуглецеве волокно або арамідні волокна (дивись фото на рис. 1.2,г). Також підсилення залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів перекриттів (покриття) шляхом нарощування перерізу може бути виконане за допомогою:

- улаштування розвантажувальних металевих балок на рівні нижньої ділянки перерізу чи площини залізобетонного балкового чи плитного конструктивного елементу: цей метод включає розміщення (підведення) металевих балок знизу конструкції для її розвантаження чи розподілу додаткового навантаження;
- улаштування в розтягувальній зоні перерізів по довжині балкового чи плитного конструктивного елементу додаткового армування із полімерних

матеріалів (арматурних стержнів чи полос) з закріпленням на рівні нижньої площини за допомогою полімерних розчинів чи клеючих сумішей;



Рис. 1.2 Посилення поперечних перерізів балки або плити монолітного залізобетонного перекриття шляхом збільшення її поперечного перерізу за допомогою: а) прокатних сталевих кутників та листових смуг; б), в) сталевих смуг з прокатного листа; г) листових смуг з полімерного матеріалу (FRP) (фото з сайту організації [2])

- улаштування розвантажувальних металевих балок на рівні верхньої ділянки перерізу чи площини залізобетонного балкового чи плитного конструктивного елементу: цей метод включає розміщення (підведення) металевих балок зверху конструкції для її розвантаження чи розподілу додаткового навантаження з улаштуванням додаткових елементів кріплення між металевими балками і конструкцією, що підсилюється;
- улаштування додаткового залізобетонного шару нарощування зверху балкового чи плитного конструктивного елементу перекриття із забезпеченням якісного зчеплення між бетоном існуючого перерізу елементу та бетоном нового шару набетонування;
- улаштування (встановлення) на рівні перерізу балкового чи плитного конструктивного елементу перекриття додаткових арматурних плоских чи просторових каркасів або металевих елементів із сталюого прокату для забезпечення цілісності і нерозрізності по довжині елемента, що підсилюється, та його міцності на зріз на приопорних ділянках;
- улаштування додаткового попереднього напруження по довжині балкового чи плитного конструктивного елементу на рівні верхньої чи нижньої його площини шляхом застосування конструктивних рішень у вигляді горизонтальних чи шпренгельних затягувань;
- улаштування додаткових елементів підсилення перерізів балкового чи плитного конструктивного елементу із склотканини, вуглепластику або листового металу з закріпленням їх на зовнішній поверхні елементу, що підсилюється, за допомогою полімерних розчинів, болтових чи анкерних з'єднань;
- улаштування додаткових конструктивних елементів чи виробів із металевих консольних балок або підкосів, за допомогою яких буде здійснюватися розвантаження чи підсилення перерізів залізобетонного балкового чи плитного конструктивного елементу.

Також одним із шляхів підсилення залізобетонних балкових конструкцій і елементів згідно п. 6.4.2 ДБН Б В.3.1-2:2016 [1] є спосіб нарощування їх перерізів розтягнутої зони за допомогою додаткового залізобетонного шару чи оболонки (сорочки) із розчину, який залежно від конструктивного рішення перекриття і

покриття будівель і споруд і технології його улаштування має більше десяти різних варіантів. Найбільш поширеними варіантами часткового підсилення розтягнутої зони залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу є (див. рис. 1.3): одностороннє підсилення шляхом нарощування перерізу на рівні нижньої грані; двостороннє підсилення шляхом нарощування бокових граней перерізу (див. рис. 1.3,б); тристороннє U-подібне підсилення перерізу шляхом його нарощування по боковим і нижній граням (див. рис. 1.3,в).

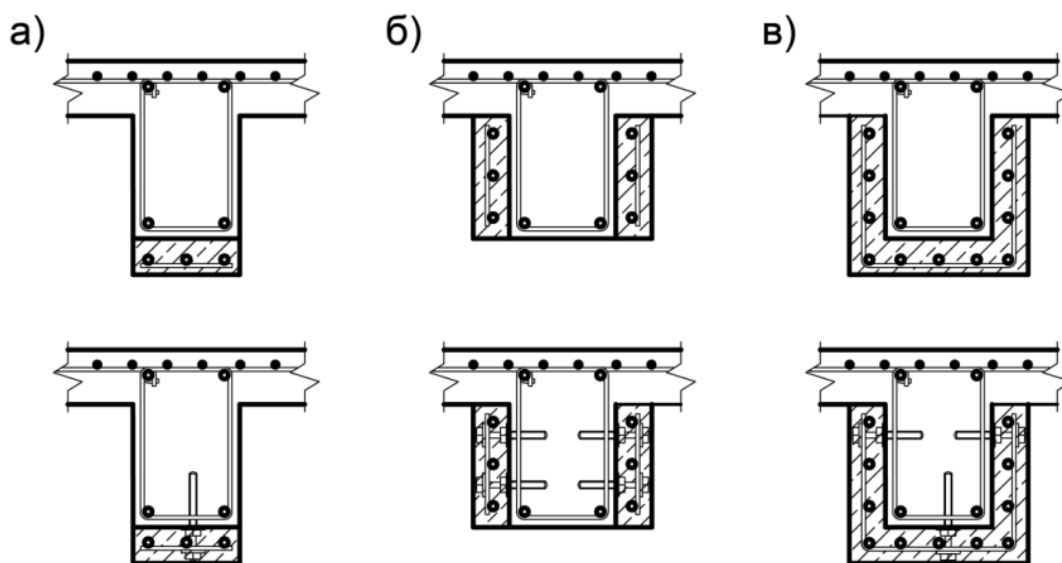


Рис. 1.3 Варіанти підсилення перерізу залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування розтягнутої зони: а) одностороннє підсилення на рівні нижньої грані; б) двостороннє підсилення бокових граней перерізу; в) тристороннє U-подібне підсилення перерізу (верхній ряд перерізів без елементів зчеплення, нижній ряд перерізів – додаткове зчеплення за рахунок встановлення болтів, дюбелів чи інших елементів)

В окремих випадках одним із варіантів способів нарощування перерізів балкових конструкцій є спосіб їх підсилення шляхом влаштування зовнішнього армування, який є досить ефективним та доцільним у відповідних конструктивних і технологічних обставинах. Принцип підсилення полягає в закріпленні (наклеюванні) за допомогою спеціальних клеючих сумішей на рівні нижньої поверхні в розтягувальній зоні балкових ЗБ конструкцій додаткового армування у вигляді високоміцних полотен, пластин або смужок (ламель) (див. рис. 1.2). В якості зовнішнього армування використовують для підсилення, як металеві, так і композитні матеріали на основі вуглецевих волокон та склопластиків.

1.2 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин балкових залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу.

1.2.1 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин балкових залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом збільшення площі їх перерізу в нижній розтягувальній зоні.

Посилення залізобетонних балкових конструктивних елементів шляхом збільшення площі їх перерізу в нижній розтягувальній зоні здійснюється за декількома напрямками: зовнішнє додаткове армування (EBR) поза межами нижньої грані їх перерізів; додаткове армування, що улаштовується в межах перерізу поблизу нижньої його грані (NSM); додаткове підсилення за допомогою залізобетонного шару набетонування.

1.2.1.1 Підсилення балкових залізобетонних конструктивних елементів шляхом збільшення їх перерізів в розтягувальній зоні за допомогою армування додатковими повздовжніми стержнями із сталі, які приварюються частково чи по всій їх довжині знизу до їх існуючих арматурних стержнів в рівні висоти або за межами їх перерізу.

В роботах [3-8] науковцями Римарем Я. В., Бліхарським З.Я., Хмілем Р.Є., Ковальчуком Б.Ф., Холодом П.Ф., Титаренко Р.Ю. експериментально були досліджені залізобетонні балки, які підсилені додатковими арматурними стержнями шляхом їх безпосереднього приварення до існуючих поздовжніх стержнів або з'єднання зварюванням з ними за допомогою коротких арматурних відрізків (коротунів) від двох до чотирьох по довжині зразка. На рис. 1.4 приведений вигляд окремих залізобетонних балок під час їх випробування на стенді.

Підсилення залізобетонних балок в роботі [3] було здійснене при рівнях навантаження $\eta=0; 0,3; 0,5$ та $0,75$ від руйнуючого моменту, коли напруження в існуючій поздовжній арматурі досягає величини межі текучості. Ефект збільшення несучої здатності при підсиленні залізобетонних балок в порівнянні з еталонними зразками без підсилення становить 30%...45%. На величину несучої здатності

балок значний вплив має рівень навантаження при їх підсиленні: при відсутності навантаження – несуча здатність є максимальною, а при величині максимального навантаження при підсиленні – величина її мінімальна [3].

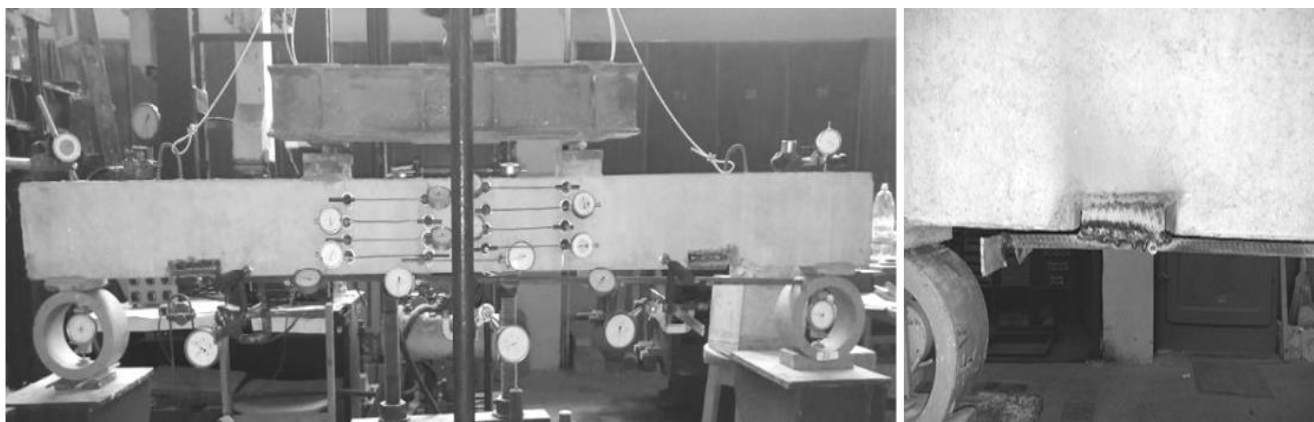


Рис. 1.4 Вигляд залізобетонної балки із окремої серії балок-зразків, які були підсилені під навантаженням за допомогою коротких арматурних відрізків (коротунів) та випробувані в роботі [7] науковцями В. Kovalchuk, Ya. Rymar*, Z. Blikharskyu, P. Kholod

Підсилення залізобетонних балок в роботі [8] при рівні навантаження рівному величині половини моменту при тріщиноутворенні ($\eta=0,5 \times M_{cr}$) додатковою арматурою без її попереднього напруження дозволило збільшити їх міцність на згин на 89%, а із використанням попереднього напруження додаткової арматури – на 93%.

У роботі Б. А. Боярчука [9] було передбачено два випадки підсилення: без попереднього навантаження; та підсилення під навантаженням із зусиллям 0,6–0,7 від руйнівного. Порівняно із непідсиленими зразками усі способи підсилення збільшують несучу здатність на 30–60 %, а тріщиноутворення приблизно на 30 % [8, 9].

У роботі [10] науковцями Akhtar Gul, Bashir Alam, Fayaz A Khan, Yasir Irfan та Khan Shezada приведені результати експериментальних досліджень міцності на згин трьох залізобетонних балок-зразків, які були підсилені в розтягувальній зоні зовнішніми сталевими стрижнями з мінімальним коефіцієнтом армування. Дві балки були посилені шляхом зварювання зовнішніх сталевих стрижнів з нижніми стрижнями зсувної арматури (див. рис. 1.5), а один зразок без зовнішнього додаткового підсилення був випробуваний як контрольний. Усі три балки були

випробувані на позитивний згин під навантаженням третьої точки згідно зі стандартом ASTM C78/C78M-10. Результати випробувань показали, що за допомогою цього методу зміцнення балок можна досягти значного підвищення їх міцності на згин та кращого розподілу тріщин в їх поперечних перерізах.

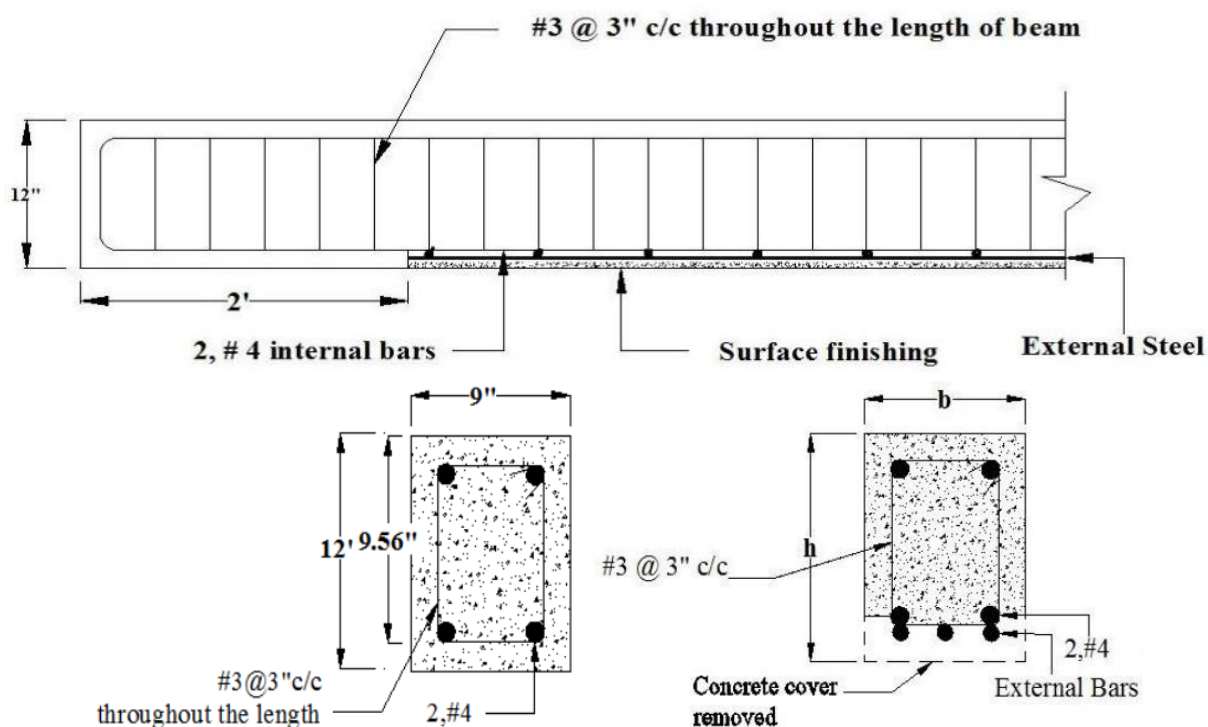


Рис. 1.5 Вигляд та розміри перерізу залізобетонної балки-зразка, що була підсилені за допомогою коротких арматурних відрізків (коротунів), які були випробувані в роботі [10] науковцями A. Gul and el.

1.2.1.2 Підсилення залізобетонних балкових конструктивних елементів додатковими повздовжніми арматурними стержнями із скловолокна в рівні висоти їх перерізу, частково чи по всій їх довжині.

У статтях [11, 12] представлено метод NSM, що включає композити NSM, а саме сталеві та вуглецево-волокнисті полімерні стрижні (CFRP), як арматуру. Експериментальні та аналітичні дослідження були проведені для вивчення характеристик міцності залізобетонних (RC) елементів, посилені композитами NSM. Армуння балок-зразків із стержнями підсилення (NSM Bar) та схема їх випробування приведені на рис. 4. Армуння перерізів балок було виконане: в розтягувальній зоні – двома стрижнями діаметром 12 мм; в стиснутій зоні – двома стрижнями діаметром 10 мм; поперечне армуння в перерізах в зоні зсуву - із стержнів діаметром 6 мм, кроком $s=50$ мм, як показано на рис. 1.6.

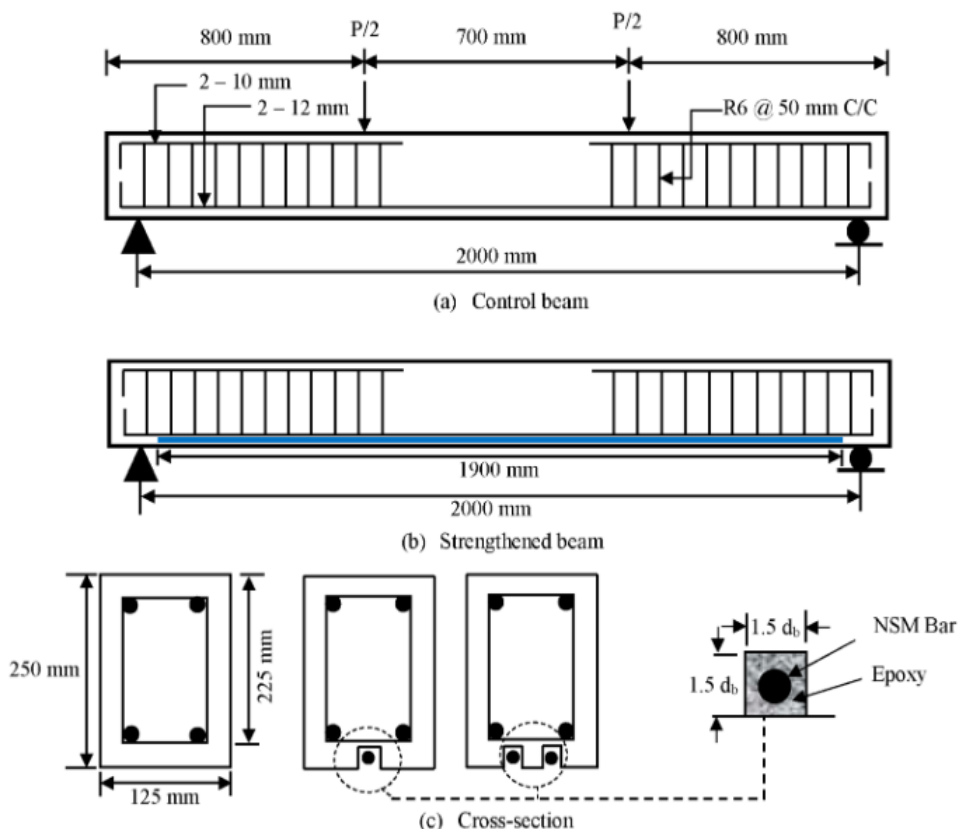


Рис. 1.6 Розрахункова схема випробовування, розміри та армування перерізів балок-зразків, які підсилені арматурними стрижнями NSM Bar [11, 12]

Міцність бетону на стиск через 28 днів становила 40 МПа згідно результатів випробувань трьох бетонних кубів розміром 100×100×100 мм.

Підсилення балок-зразків було виконане: високоміцними сталевими стрижнями діаметром 6, 8, 10, 12 та 16 мм (E Steel Sdn. Bhd., Кланг, Малайзія) з межею текучості 520 МПа та межею міцності – 570 МПа, модуль пружності для всіх стрижнів становив 200 ГПа; ребристими прутками з вуглецевого волокна діаметром 12 мм (Haining Anjie Composite Material Co., Ltd., Хайнін, Китай), які мали міцність на розтяг та модуль пружності відповідно 1850 МПа та 124 ГПа. Для закріплення арматурних прутків з бетонною основою в борознах (заглибленнях) по довжині балок використовувався епоксидний клей Sikadur® 30 (Sika Corporation, Ліндхерст, Нью-Джерсі, США). Клей Sikadur® 30 складається з двох компонентів, а саме компонента А та компонента В. Компонент А має білий колір, а компонент В – чорний. Ці два компоненти змішували у співвідношенні 3:1 до отримання однорідного сірого кольору. Густина після змішування становила

1,65 кг/л при 23°C. Міцність зчеплення епоксидної суміші згідно з DIN EN 24624 становила 21 МПа - зі сталлю та 4 МПа - з бетоном.

За результатами випробувань оцінювалися: характеристика руйнування, плинність та гранична міцність, прогин, деформація та поведінка балок при розтріскуванні. Результати випробувань балок свідчать про збільшення їх міцності на згин при тріщиноутворенні на 69%, а при граничному навантаженні - на 92% порівняно з контрольною балкою-зразком [11, 12].

В роботі [13] Hadeel S. AL-Ameedee та Hayder M. Al-Khafaji були проведені експериментальні дослідження 4-х залізобетонних балок (розміром $b \times h \times l = 150 \times 300 \times 1500$ мм) на згин, переріз яких був зміцнений в розтягненій зоні стрижнями різних типів, що монтуються близько до зовнішньої поверхні (NSM) (див. рис. 1.7).

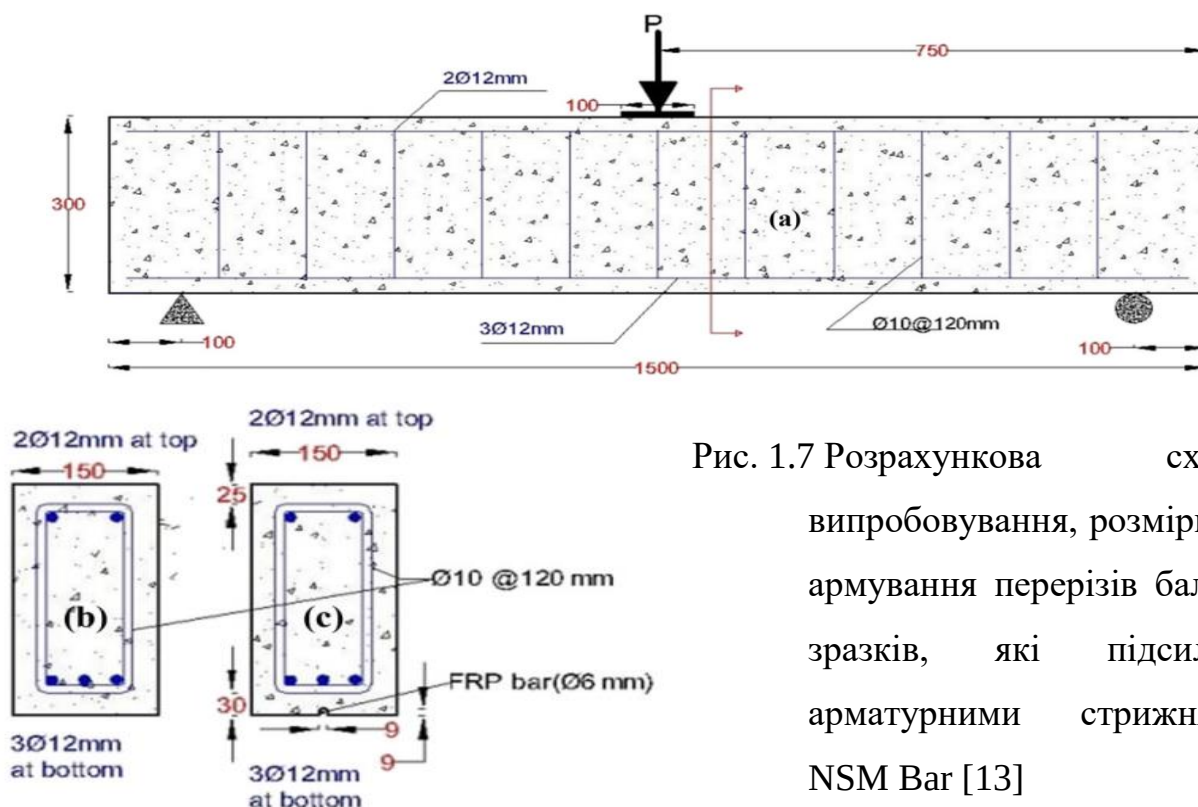


Рис. 1.7 Розрахункова схема випробовування, розміри та армування перерізів балок-зразків, які підсилені арматурними стрижнями NSM Bar [13]

Три балки були посилені різними елементами (стержнями) з NSM (вуглецевий волокнистий полімер [CFRP], скловолокнистий полімер [GFRP] та сталь), а одна балка, що була незміцнена, використовувалася як контрольний зразок. Зразки були випробувані під монотонним статичним навантаженням для визначення впливу посилення армування з волокнистого полімеру (FRP).

Результати випробувань показали [13], що використання стрижнів з NSM-CFRP для посилення залізобетонних балок покращує їх здатність на згин та жорсткість.

Експериментальні дослідження впливу на міцність при згині і зрізі додаткового армування стержнями із полімерів і сталі, які встановлюються в межах перерізу поблизу нижньої грані при підсиленні залізобетонних балок (NSM), також були проведені в роботах [14-21], а чисельні моделювання їх напружено-деформованого стану - в роботах [22, 23].

1.2.1.3. Підсилення залізобетонних балкових конструктивних елементів додатковими повздовжніми елементами із фасонного чи арматурного прокату, скловолокна, вуглепластику, полімерного матеріалу чи іншого складеного перерізу знизу, поза межами перерізу балки, частково чи по всій їх довжині.

Науковці М.У. Alkhateeb та Ф. Нежазі в роботі [24] запропонували нову схему посилення залізобетонних балок з використанням стрижнів з вуглецевого волокна (CFRP), закріплених сталевими пластинами та анкерними болтами, що отримала назву системи механічного анкерування (MAS) (див. рис. 1.8). Ця система може мати додаткову захисну зовнішню бетонну оболонку для захисту елементів MAS та стрижнів CFRP.

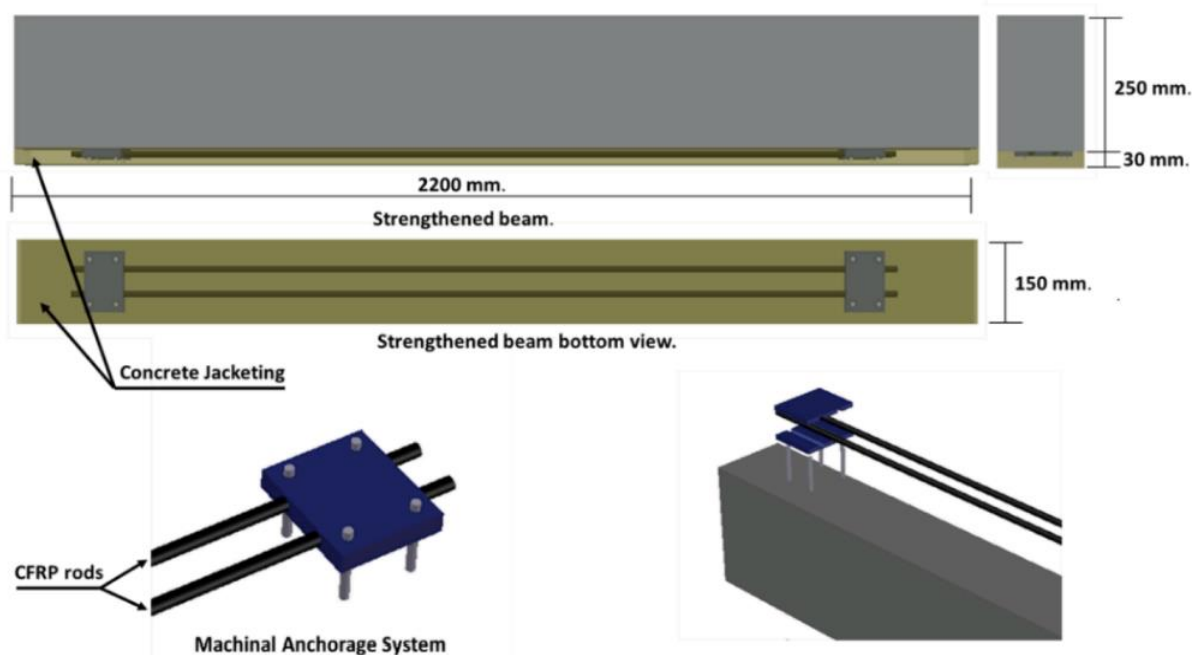


Рис. 1.8 Елементи системи підсилення балки із сталевих пластин і анкерних болтів (MAS) та стрижнів із вуглецевого волокна (CFRP) [24]

Ефективність запропонованого методу підсилення була перевірена на восьми балках-зразках з різними конфігураціями додаткового армування (див. рис. 1.9 та рис. 1.10). При дослідженні визначали ефективності параметрів проектування, включаючи кількість стрижнів CFRP, вклад MAS та бетонної оболонки (CJ), з точки зору несучої здатності, утворення тріщин, характеру руйнування та пластичності. Результати показали, що ефективність запропонованої системи посилення досягається за рахунок збільшення несучої здатності посилених балок та запобігання передчасному відшарування стрижнів CFRP [24].

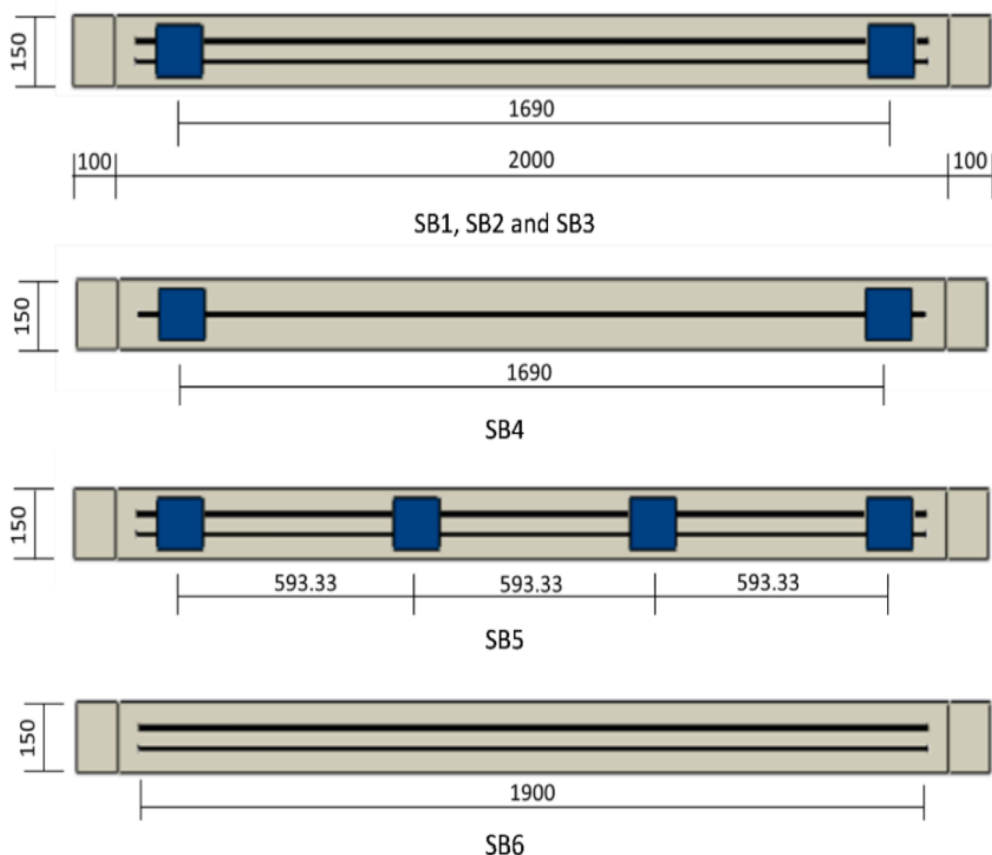


Рис. 1.9 Варіанти конструктивного вирішення додаткового підсилення балок в розтягувальній зоні, які були досліджені в роботі [24]

У статті [25] F. Oudah and R. El-Nacha досліджували міцність RC балок, посилених за допомогою попередньо напружених стрічок та стрижнів з вуглецевого FRP, які встановлювалися близько до їх поверхні (NSM) та закріплювалися до них за допомогою сталевих анкерів. Вісім RC балок були випробувані під навантаженням на втому протягом 3-х мільйонів циклів з частотою 2 Гц. Контроль значень деформацій в стернях CFRP поблизу анкерних

кріплення здійснювався за допомогою тензодатчиків, які давали достовірне уявлення про величину прослизання CFRP на граничній стадії.

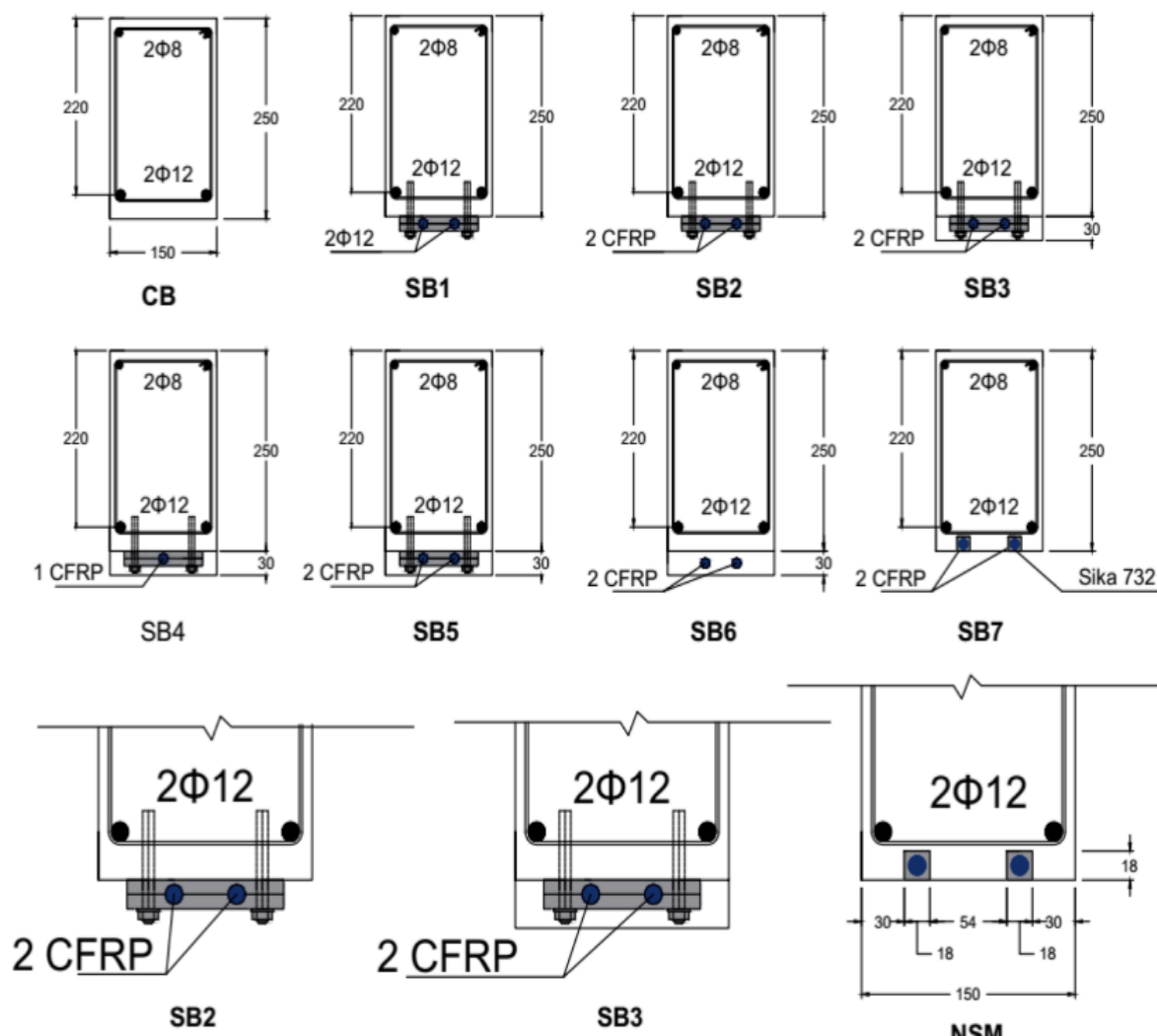


Рис. 1.10 Розміри та армування поперечних перерізів балок-зразків, які були досліджені в роботі [24]

Був досліджений вплив збільшення рівня попереднього напруження на величину прослизання стержнів та розтріскування бетону в місцях їх анкерування до балок. Результати випробувань показали виникнення прослизання анкерних кріплень у сильно попередньо напружених балках, тоді як незначне прослизання спостерігалось для балок, попередньо напружених до низьких рівнів попереднього напруження. Також спостерігалось збільшення висоти та ширини тріщин у місці розташування анкерів зі збільшенням рівня попереднього напруження. Зсув у залізобетонних балках, посилені за допомогою смуг NSM CFRP, був менший, ніж у аналогічних балках, посилені за допомогою стрижнів NSM CFRP [25].

В останні кілька десятиліть для посилення балкових залізобетонних конструктивних елементів широко застосовуються полімерні матеріали, армовані скловолокном (FRP), або вуглецево-волокнистий полімер (CFRP), чи армований полімер з натуральним волокном (NFRP), так як вони мають високе співвідношення міцності до щільності, підвищений рівень жорсткості та стабільну хімічну стійкість. В обзорних наукових статтях [26-30] представлені різні методи та способи посилення залізобетонних та попередньо напружених бетонних конструкційних елементів з використанням FRP-матеріалів, процедури посилення, такі як підготовка поверхні, адгезійне затвердіння, конструктивні розміри і місце розташування полімерних елементів підсилення по відношенню до перерізів балкових елементів, а також обговорюються різний характер їх руйнування та тріщиноутворення. Дослідження Effiong J.U. і Ede A.N. в роботі [26] показали, що композити з натуральним волокном, армованим полімером (NFRP), можуть бути альтернативою синтетичним FRP-композитам для зміцнення бетонних балок.

В роботі R. Al-Amery та R. Al-Mahaidi (2006) [31] представлено напрям підсилення та ремонту залізобетонних балок із використанням стрічкових елементів із вуглепластикового композиту (CFRP straps). Експериментально показано [31], що застосування CFRP-систем при підсиленні залізобетонних балок забезпечує підвищення їх несучої здатності при згині і зсуву, підвищує опір розвитку тріщин і змінює характеру руйнування конструкцій у більш сприятливий бік.

Вагомий внесок в дослідження міцності на згин, жорсткості та тріщиностійкості залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами, був зроблений вітчизняними науковцями в експериментально-теоретичних роботах [32-36].

Узагальнюючи наведені результати, можна відзначити, що поєднання фасонного чи арматурного прокату, скловолокна чи інших мінеральних високоміцних матеріалів із вуглепластикового композиту і полімерних технологій формує сучасний напрям ефективного підсилення та реконструкції залізобетонних балкових конструктивних елементів.

1.2.1.4. Посилення залізобетонних балкових конструктивних елементів шляхом збільшення площі їх перерізу в нижній розтягувальній зоні за допомогою елементів попередньо-напруженої затяжки, які улаштовуються на рівні висоти та поза межами нижньої грані їх перерізів.

В наукових роботах [37-43] М. Г. Чекановичем у співавторстві з іншими вітчизняними науковцями були запропоновані методи і конструктивні рішення з підсилення ЗБ балок, які базуються на застосуванні попереднього напруження окремих конструктивних елементів затяжки із стрижнів чи тросів. В роботах [37, 38] запропонована конструкція підсилення з інтенсивним натягом арматури затяжки і розтяжок під дією зовнішнього навантаження (див. рис. 1.11), яка дозволяє виконати перерозподіл зусиль в ЗБ балці, підвищуючи її несучу здатність, трищиностійкість та знижуючи величину прогину.

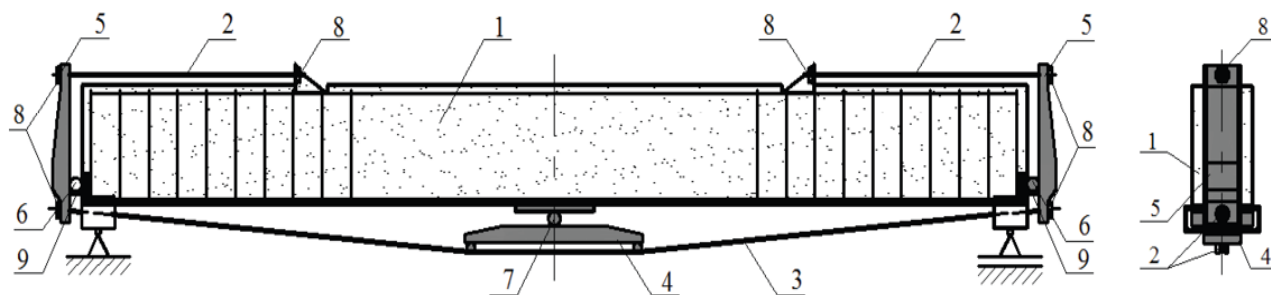


Рис. 1.11 Загальний вигляд конструкції підсилення залізобетонної балки важільно-стрижневою системою [37]: 1- балка, що підсилюється; 2 – розтяжки; 3 – затяжка; 4 – траверса; 5 – двоплечові важелі; 6, 7 – котки; 8 – комплекс кріплень із сферичними шайбами; 9 – упор

В науковій роботі [39] М. Г. Чекановичем, В.П. Журахівським та О.М. Чекановичем було представлено нову конструкцію підсилення однопрольотних залізобетонних балок прямокутного перерізу за допомогою зовнішньої сталевих арматури з жорсткими й гнучкими елементами, яка дозволяє здійснювати розвантаження їх перерізів у верхній стиснутій зоні балки при одночасному стисканні її нижньої розтягнутої зони. В роботі [39] наведені експериментальні дані дослідження серій балок з різними параметрами конструкції підсилення та запропоновані розрахункові схеми і методика розрахунку комбінованого перерізу ЗБ балки при її підсиленні регульованою конструкцією із зовнішніми стрижнями з важелями, яка приведена на рис. 1.12.

В результаті експериментальних досліджень підсилених ЗБ балок було встановлено [39]: несуча здатність у балках, посиленних системою, що включає жорсткі важелі та один зовнішній дротяний елемент діаметром 5 мм у кожній гілці

збільшилася у 2,7 рази, а у балках, посилених двома зовнішніми дротяними елементами у кожній гілці - у 3,5 рази, а при використанні трьох дротяних елементів несуча здатність посиленних балок збільшилася у 3,85 рази. Збільшення несучої здатності балок, посиленних без важелів, склало 3,3 рази, коли гілки конструкції посилення склалися із двох дротяних елементів, а при зміні місця кріплення підсилюючої гілки несуча здатність балок-зразків збільшилася у 4,42 рази; посилені балки мали значно більшу жорсткість, ніж звичайні, так балка-зразок з жорсткими важелями та трьома дротяними елементами в одній гілці показала найбільшу жорсткість.

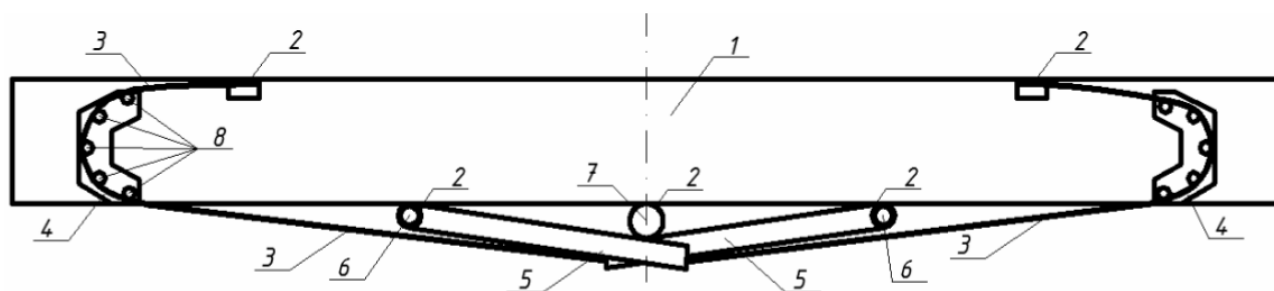


Рис. 1.12 Схема 3Б балки із запропонованою регульованою конструкцією посилення зовнішніми стрижнями з важелями [39]: 1 – залізобетонна балка; 2 – сталеві пластини, закріплені на поверхні балки; 3 – зовнішні стрижні; 4 – напрямний елемент; 5 – конструкція у вигляді двох важелів, що створює напруження; 6 – шарнір; 7 – ролик; 8 – напрямні ролики для елементів 4

1.2.2 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин балкових залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом збільшення площі їх перерізу з одного чи двох його боків та одночасно з двох боків і знизу за допомогою металевих елементів із полосової чи фасонної сталі.

1.2.2.1 Підсилення залізобетонних балкових конструктивних елементів шляхом нарощування їх перерізів з двох боків по всій їх довжині за допомогою металевих елементів із полосової чи фасонної сталі.

Порівняно з іншими методами підсилення, метод сталевих обшивок не тільки менш просторово місткий, простий в установці та легкий, але також не схильний до відшаровування [44, 45]. Техніка болтового кріплення бокових пластин (BSP), тобто анкерування сталевих пластин до бічних граней залізобетонних балок за допомогою болтів, є однією з технік сталевих обшивок та може збільшити здатність при згині залізобетонних балок без помітного

зниження їх пластичності завдяки збільшенню перерізів як стискаючій, так і в розтягувальній зонах [46]. Крім того, вона також може збільшити міцність на зсув та жорсткість залізобетонних балок, оскільки сталеві пластини, прикріплені болтами до бічних граней, знаходяться в тій самій площині, що й сила зсуву.

В науковій роботі [44] вченими Ling-Zhi Li, Chang-Jiu Jiang, Ray Kai-Leung Su і Sai-Huen Lo були проведені експериментальні випробування на залізобетонних балках-зразках, які посилені сталевими пластинами і болтовими з'єднаннями (див. рис. 1.13 і рис.1.14), з метою дослідження механізму перенесення зсувної сили анкерними болтами в балках BSP та пропонують практичний метод оцінки впливу поперечної часткової взаємодії між компонентами на конструкцію підсилення балок. У статті [44] запропоновано спрощену пошарово-лінійну модель перенесення зсуву, засновану на принципі суперпозиції сил та спрощеній деформаційній моделі зсуву, що була отримана з попереднього числового дослідження.

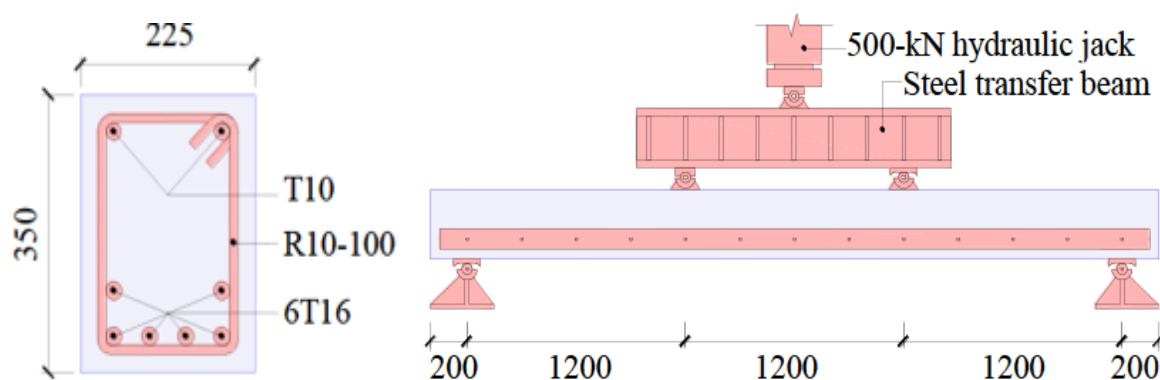


Рис. 1.13 Переріз і установка для випробування балок-зразків в роботі [44]

Величину зсувного зусилля визначали із рівноваги сил за умови сумісного деформування (зміщення) компонентів в складеному перерізі балки. Також було отримано набір розрахункових формул для визначення міцності на згин балок BSP за кількома основними випадками навантаження [44].

В статті [45] Xin Liu et al. (2018) був проведений огляд попередніх експериментальних, теоретичних та числових досліджень [47] авторів щодо зсувних характеристик залізобетонних балок, які були підсилені способом нарощування перерізу за допомогою бокових сталевих пластин та болтових кріплень (метод BSP). На рис. 1.15 приведена схема випробування балок-зразків,

яка була застосована в роботі [45].

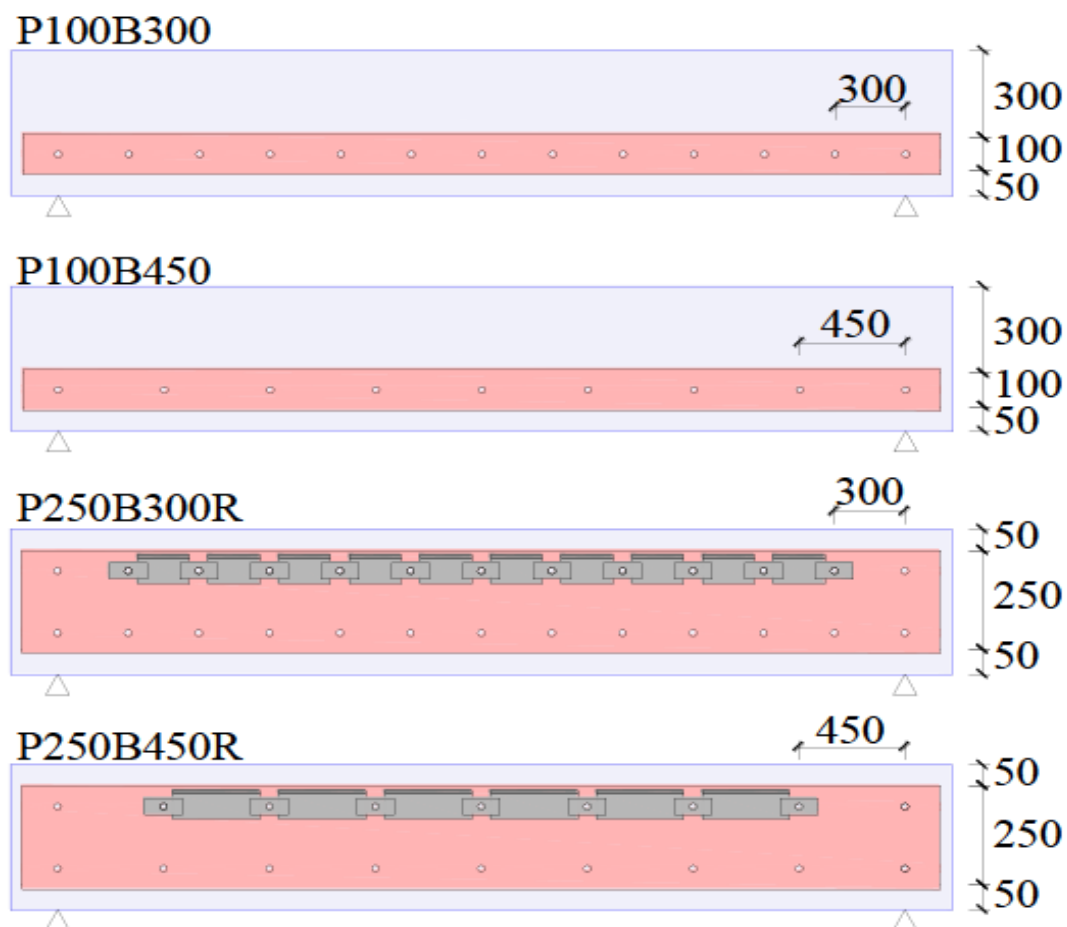


Рис. 1.14 Загальний вигляд зразків, посиленних сталевими пластинами та болтовими з'єднаннями в роботі [44].

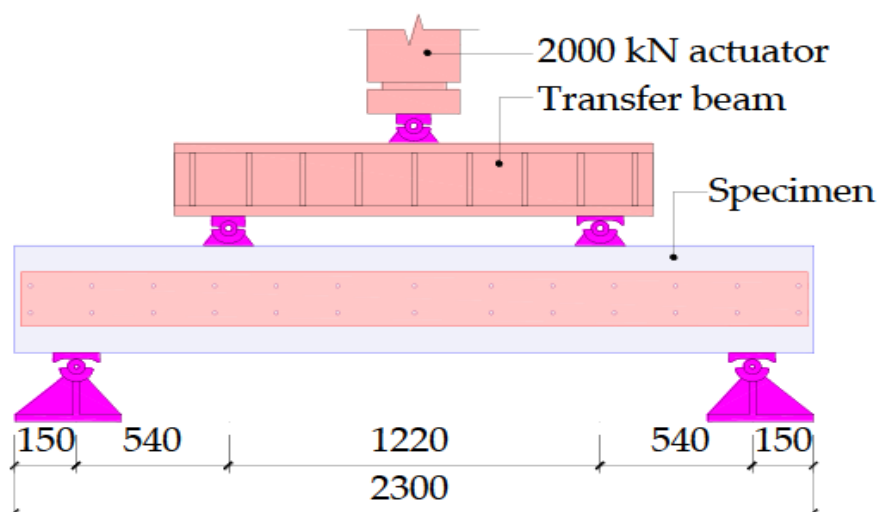


Рис. 1.15 Схема випробовування балок-зразків на пресі з метою дослідження міцності їх перерізів на зріз в роботі Xin Liu et al. (2018) [45]

На рис. 1.16 приведені варіанти балок-зразків, які були випробувані під час проведення експериментальних досліджень [45].

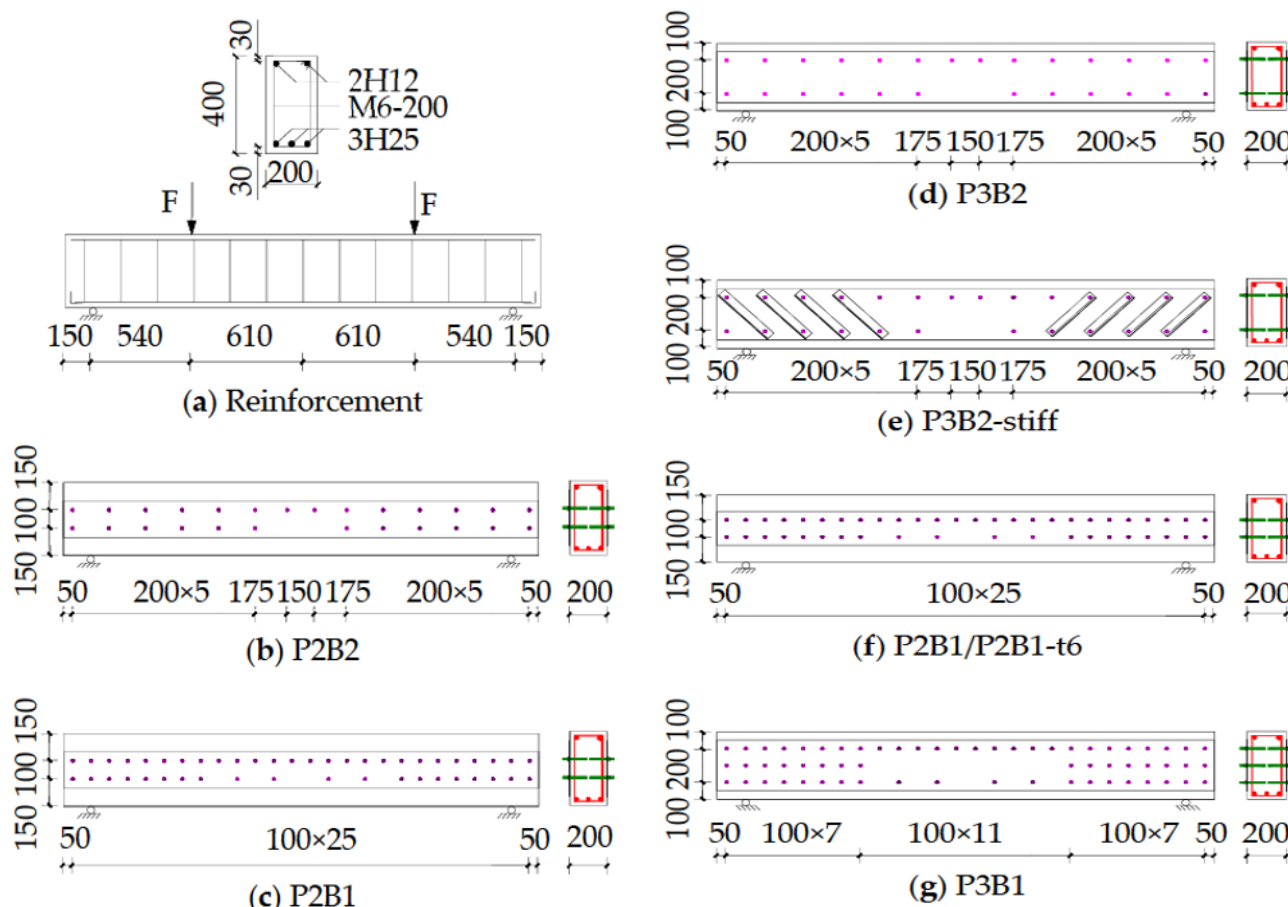


Рис. 1.16 Варіанти посилення боковими пластинами та болтовими кріпленнями (метод BSP) залізобетонних балок-зразків (розміри в мм) з метою дослідження міцності їх перерізів на зріз в роботі Xin Liu et al. (2018) [45]

Детально були досліджені фактори, які впливали на міцність перерізів балок при зрізі, а саме: міцність бетону; розміри поперечного перерізу сталевих листів; величина прольоту згину і зсуву; поздовжня відстань між болтами та кількість рядів болтів. В роботі [45] для оцінки характеристик міцності балок на згин і зсув, підсилені методом BSP, також було запропоновано дві можливі теоретичні моделі, засновані на сумісності деформацій та спрощеному поперечному зсуву (зрізу) їх перерізів. При порівняльному аналізі міцності на зріз середня абсолютна похибка у збіжності величин між результатами експериментальних випробувань балок та запропонованими двома теоретичними моделями відповідно становила 2,7% та 5,9% [45].

В науковій роботі [46] вченими Ling-Zhi Li, Xin Liu, Yi Luo, Mei-Ni Su і Ji-Nua Zhu (2019) були проведені дослідження на 5-ти залізобетонних балках, 4-и із яких були підсилені з боків сталевими пластинами (див. рис. 1.17) по всій довжині

елементів. Закріплення сталевих пластин до балок здійснювалося за допомогою болтових з'єднань, які були встановлені симетрично в стисненій і розтягувальній зонах перерізів з кроком $u=280$ мм.

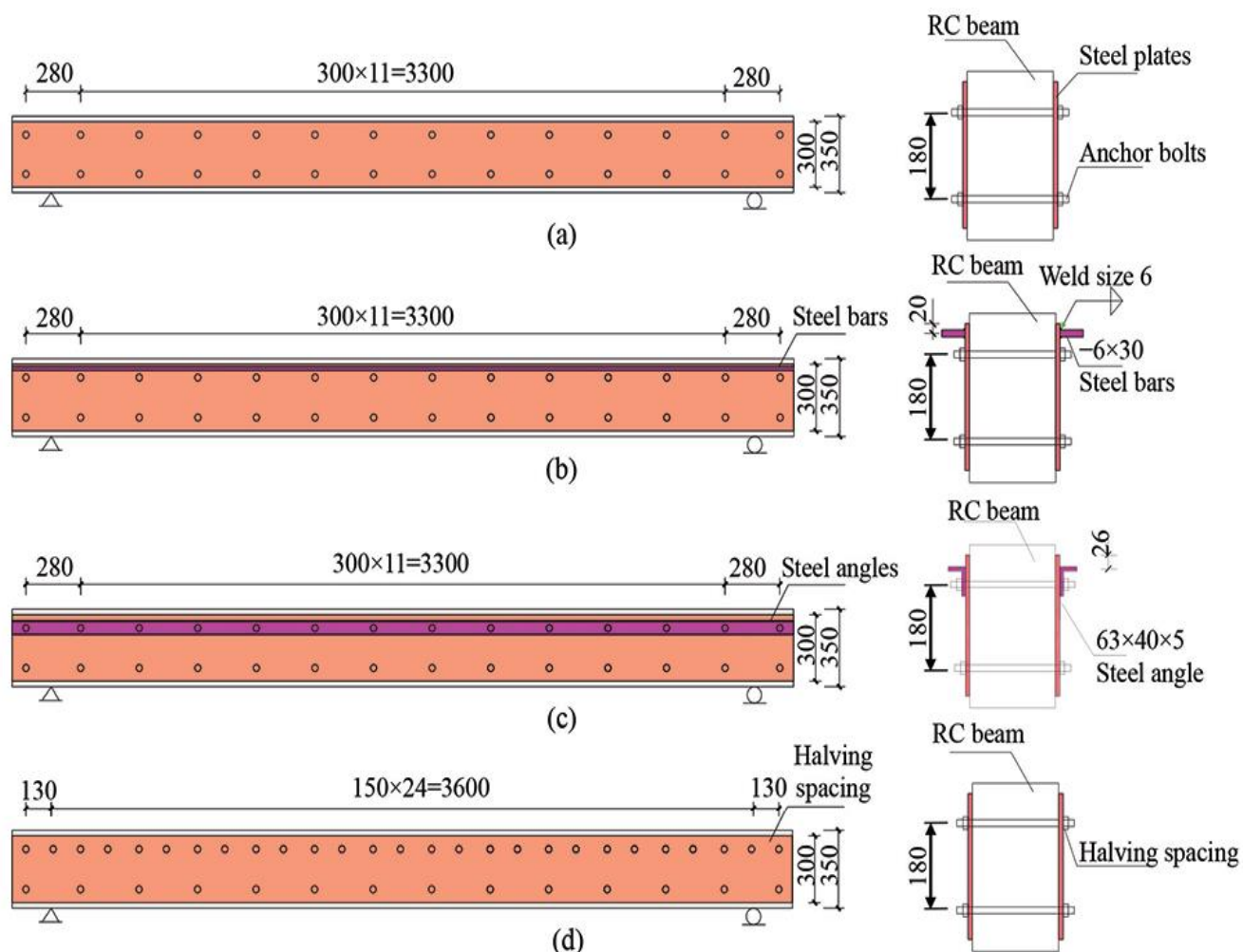


Рис. 1.17 Загальний вигляд та розрізи поперечного перерізу балок марок: (a) BSP-N; (b) BSP-B; (c) BSP-A; та (d) BSP, які були випробувані в роботі [46].

Результати досліджень [46] показали, що: метод підсилення залізобетонних балок за допомогою бокових сталевих накладок і болтових з'єднань (метод BSP) може значно збільшити їх міцність на згин та жорсткість; заходи з обмеження вигину можуть додатково покращити міцність на згин та пластичність балок, одночасно пригнічуючи локальне вигинання та зменшуючи відносне просковзування на межі дотику сталевих елементів з бетоном; порівняння теоретичних та експериментальних результатів підтвердило доцільність та точність запропонованої в роботі аналітичної моделі розрахунку.

1.2.2.2 Підсилення залізобетонних балкових конструктивних елементів шляхом нарощування їх перерізів одночасно з двох боків і знизу їх нижньої грані по всій їх довжині за допомогою металевих елементів із полосової чи фасонної сталі.

У роботі [48] Min Sook Kim і Young Hak Lee були проведені дослідження для оцінки конструктивних характеристик залізобетонних балок, що були підсилені попередньо виготовленими окремими модульними стальними елементами (деталлями), які встановлювалися в проектне положення за допомогою болтів і хімічних анкерів (див. рис. 1.18). Для оцінки було виготовлено загалом п'ять зразків, включаючи одну залізобетонну балку та чотири залізобетонні балки, яку були підсилені модульними сталевими пластинами. Моделювання методу підсилення балок було виконане, враховуючи реальні умови їх розташування в перекритті, коли на верхню їх грань обпираються його плитні елементи. Бетонні балки всіх зразків були розроблені шириною $b=300$ мм, висотою $h=350$ мм, довжиною $l=4,5$ м (див. рис. 1.20). Товщина модульних конструктивних елементів становила: Z-подібної бічної пластини – $t=2,5$ мм; L-подібних нижніх пластин – $t=5$ мм. Відстань між хімічними анкерами та болтами становила в елементах $a=300$ мм, а формат їх встановлення – у вигляді зигзагу. Товщина нижньої плити та кількість вертикальних сіток розглядалися як експериментальні змінні, які, як очікується, впливатимуть на поведінку при згинанні, і представляють відповідну частину кожної змінної на рис. 1.18. Глибина нових балок становила 100 та 150 мм, товщина нижніх плит – 5 та 10 мм, а кількість вертикальних сіток – 0, 2 та 4. Для зразка з двома вертикальними сітками крок між кожною сіткою становив 200 мм, а для зразка з чотирма вертикальними сітками кожна сітка була встановлена з кроком 65 мм. Специфікація зразка наведена в таблиці 3 [48], а деталі зразка відповідно до і після підсилення показані на рис. 1.19. Міцність на стиск бетону на 28-день, який використовувався в експерименті, становила 24 МПа. Для армування на розтяг та стиск використовувалася деформована арматура діаметром 19 мм з межею текучості 400 МПа. Використовувався сталевий лист з межею текучості 275 МПа. Для з'єднання елементів підсилення з

бетонними балками використовувалися високоміцні болти F10T M16 діаметром 16 мм.

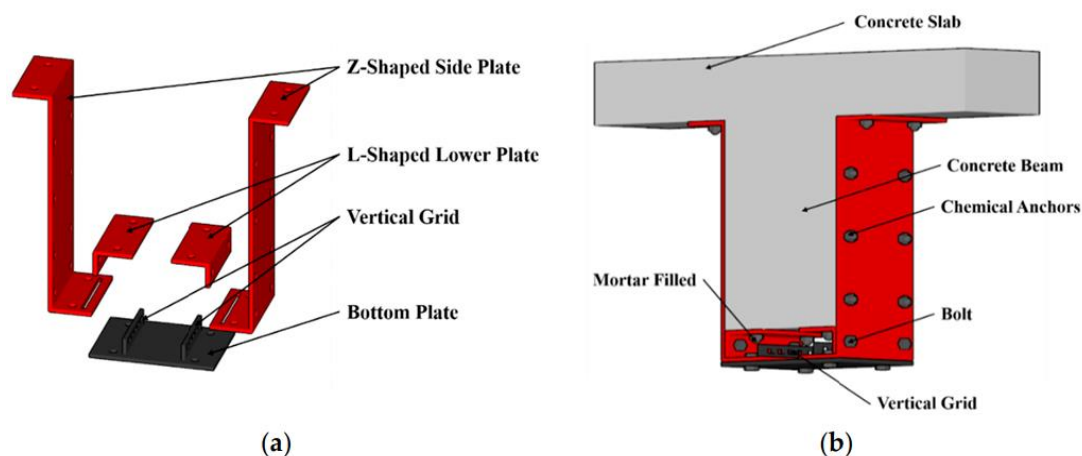


Рис. 1.18 Модульні конструктивні елементи для підсилення балок-зразків в роботі [48]

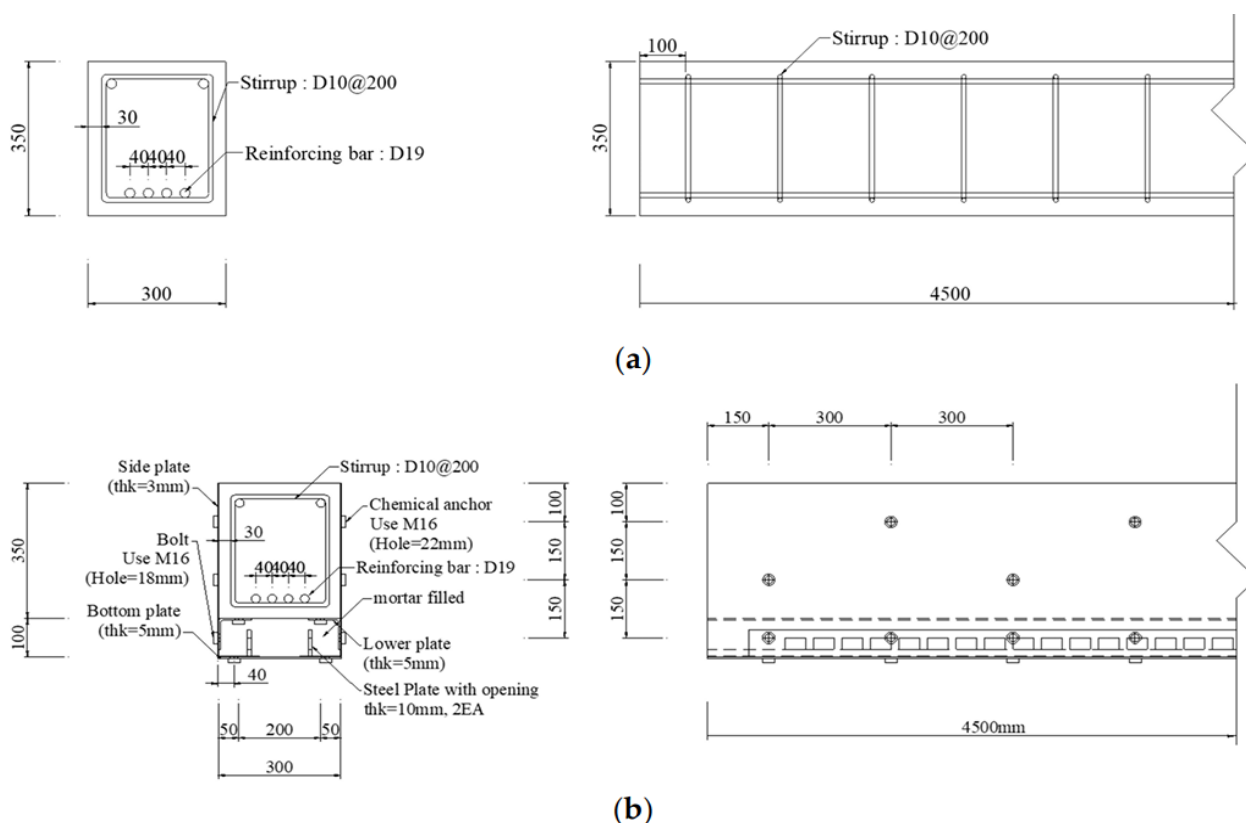


Рис. 1.19 Розміри балок-зразків, що були випробувані в роботі [48]: а) залізобетонна балка-зразок без підсилення; б) залізобетонна балка-зразок, підсилена сталлюю обіймою з боків та нижньої грані

У цьому дослідженні частини плити (фланці) Т-подібного перерізу забезпечують лише простір для кріплення сталевих пластин за допомогою

хімічних болтів. Тому фланці не враховувалися під час виготовлення зразків, як показано на рис. 1.19.

Для оцінки конструктивних характеристик бетонних балок, модернізованих запропонованими деталями, було випробувано п'ять бетонних балок з модернізацією та без неї. Запропонований метод модернізації значно збільшив як максимальну вантажопідйомність, так і пластичність залізобетонних балок.

Результати випробувань показали [48], що характеристики згинання існуючих залізобетонних балок збільшилися в 3 рази, пластичність - в 2,5 рази, а здатність до розсіювання енергії - в 7 разів.

1.2.3 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин балкових залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом збільшення площі їх перерізу зверху, з одного чи двох його боків та одночасно з двох боків і знизу за допомогою улаштування додаткового залізобетонного шару, який виготовлений із: високоміцного бетону, фібробетону (UHPFRC); фіброармованого цементного композиту (HPFRCC); самоущільнювального бетону (SCC), армованою сталевую дротяною сіткою.

В наукових дослідженнях [49-58] проведені комплексні огляди ефективності застосування надвисокоєфективного фібробетону (Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete - UHPFRC) у посиленні залізобетонних балкових і плитних конструкцій. Так в роботі [49] науковцями Huang et al. був проведений критичний огляд попередніх досліджень вчених, які присвячені вивченню впливу на міцність при зрізі чи згині різних способів посилення залізобетонних конструкцій за допомогою додаткового шару із надвисокоєфективного фібробетону (UHPFRC). При порівняльному аналізі способів були досліджені наступні конструктивні фактори впливу: зміна міцності основного бетону залізобетонних елементів (дивись рис. 1.20,а) та кількість (вміст в %) сталюї фібри в додатковому шару UHPFRC (дивись рис. 1.20,б); місце розташування шару підсилення UHPFRC по відношенню до граней залізобетонного елементу та наявність в ньому армування (дивись рис. 1.21,а і рис. 1.21,б); зміна конфігурації способів з'єднання (зчеплення)

між додатковим залізобетонним шаром UHPFRC та основним бетоном залізобетонного елементу NSC, що підсилюється, на їх міцність при зсуві (зрізі) (дивись рис. 1.22,а); зміна величини відношення прогону зсуву до висоти перерізу залізобетонних елементів, які підсилені трьома різними способами за допомогою додаткового шару фібробетону UHPFRC (дивись рис. 1.22,б).

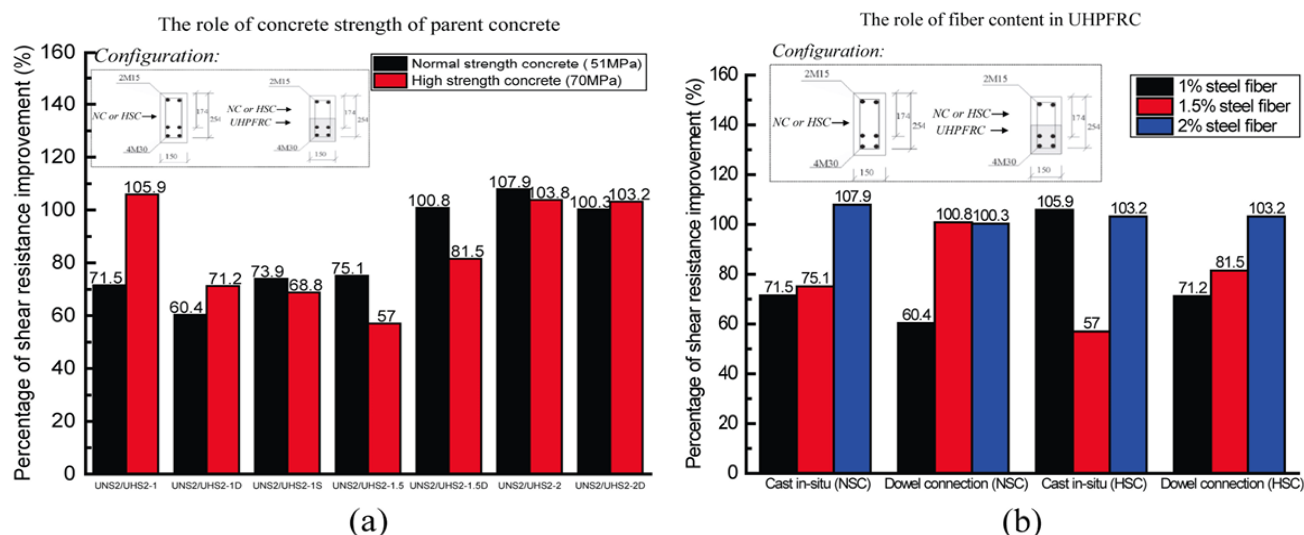


Рис. 1.20 Параметричний аналіз зміцнення на зсув залізобетонних елементів за допомогою UHPFRC та відсоток покращення опору зсуву зі зміною: (а) міцності бетону в перерізах балок: червоний колір – міцність основного бетону становить $f_c=51$ МПа; чорний колір - міцність основного бетону $f_c=70$ МПа; (б) кількості (вмісту) сталевих фібри в додатковому шарі UHPFRC: чорний колір – 1 % сталевих фібри; червоний колір – 1,5% сталевих фібри; синій колір – 2% сталевих фібри [49]

Порівняльний аналіз способів підсилення перерізів залізобетонних конструкцій за допомогою додаткового шару надвисокоміцного, стійкого до зносу бетону (UHPFRC) дозволили зробити наступні висновки [49]:

- для посилення існуючих бетонних та залізобетонних конструкцій за допомогою додаткового шару фібробетону UHPFRC зазвичай застосовуються три основні методи його улаштування, а саме: улаштування на місці розташування конструкції; з'єднання додаткового шару з бетонними поверхнями конструкції за допомогою клеючої суміші; улаштування в проектному положенні за допомогою додаткового механічного анкерування. Всі способи і методи підсилення є ефективними та демонструють загалом хороші показники підвищення несучої здатності та деформативності конструкцій за умови відсутності початкових чи проміжних їх руйнувань;

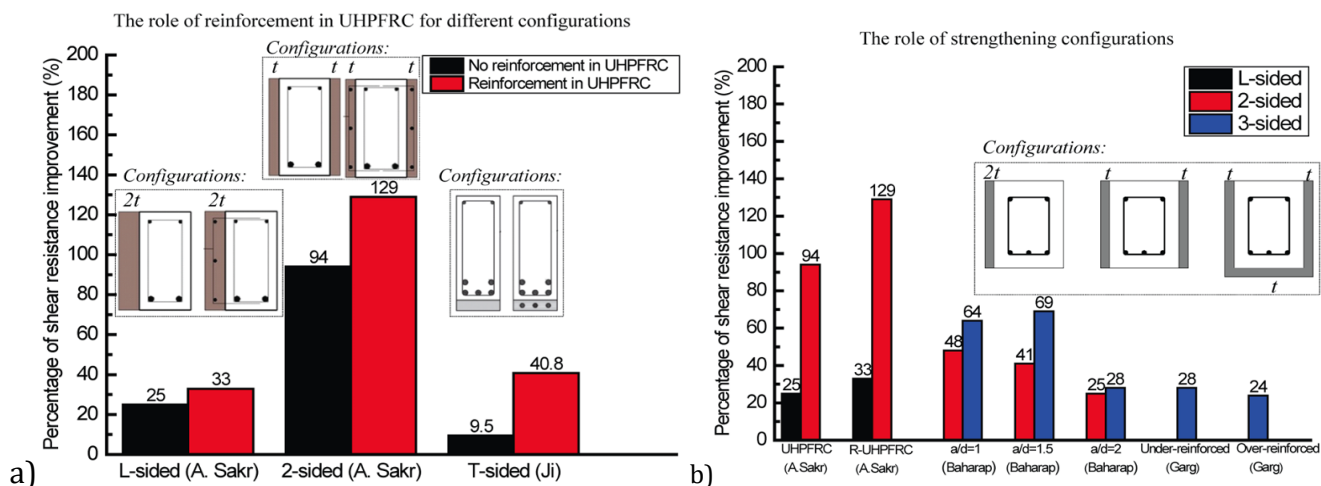


Рис. 1.21 Параметричний аналіз міцності на зсув залізобетонних прогонних елементів, підсилені за допомогою додаткового шару UHPFRC товщиною t [49]: а) залежно від зміни способу підсилення та армування: чорний колір – додатковий шар UHPFRC без армування; червоний колір – додатковий шар UHPFRC з армуванням перерізу; б) залежно від зміни способу підсилення їх перерізу: чорний колір – однобічне розташування шару підсилення; червоний колір – з двох боків; синій колір – розташування шару підсилення з двох боків і знизу

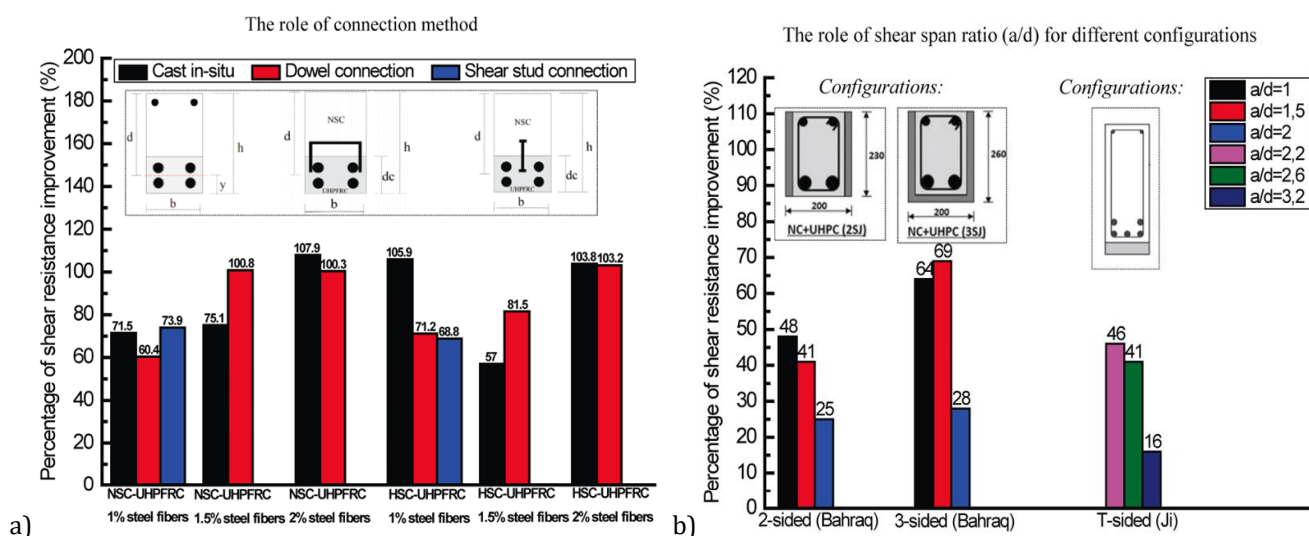


Рис. 1.22 Параметричний аналіз [49]: а) впливу конфігурації способів з'єднання (зчеплення) між додатковим залізобетонним шаром UHPFRC та основним бетоном залізобетонного елементу NSC, що підсилюється, на їх міцність при зсуві (зрізі): чорний колір – улаштування шару високоміцного бетону при виготовленні елементу; червоний колір – з'єднання за допомогою дюбелів; синій колір – з'єднання за допомогою штифтів; б) міцності на зсув залізобетонних елементів, які підсилені за допомогою додаткового шару UHPFRC, залежно від величини прогону зсуву (a/d - відношення прогону зсуву (a) до висоти перерізу елементу

(d)): різним кольором позначені відношення величини a/d від $a/d=1$ до $a/d=3,2$.

- міцність бетону на стиск та метод з'єднання мають незначний вплив на характеристики зсуву композитної конструкції за умови, що межа розділу між компонентами не руйнується. Покращення зсувної здатності збільшується, коли арматура розміщується в додатковому шарі підсилення UHPFRC або коли коефіцієнт зсувного прольоту ($f=a/d$) зменшується. Із збільшенням величини відношення прогону зсуву до висоти перерізу залізобетонного елементу (a/d), посиленого додатковим шаром UHPFRC, міцність на зріз зменшується у співвідношенні приблизно від 1 до 1/3 (дивись рис. 1.22,b).

В роботах [50-54] за результатами оглядів були оцінені критичні параметри, а саме: технологія з'єднання; конфігурація (різнобічне) посилення; вплив співвідношення сталевих волокон та проценту армування шару UHPFRC і його товщина; граничне навантаження та режим руйнування та ін. Крім того, розглядалися креативні рішення, числові та аналітичні моделі для відтворення структурної поведінки та несучої здатності залізобетонних елементів, посилених за допомогою UHPFRC. В результаті аналізу проведених наукових досліджень науковцями в роботах [55-58] були обґрунтовані висновки щодо факторів впливу на міцність і тріщиностійкість залізобетонних балкових елементів, підсилених шляхом нарощування різними способами їх перерізу, а саме:

- різні способи (конфігурації) з підсилення (модернізації) перерізів мають значний вплив на момент тріщиностійкості елементів порівняно з максимальним моментом у випадку їх зміцнення на вигин;
- співвідношення відстані від опори до зосередженого навантаження (a) і ефективної висоти перерізу елементу (d) (прогону зсуву $\lambda=a/d$) та товщина шару нарощування їх перерізу (додаткового підсилення шляхом бетонування) (Δd) мають значний вплив на їх міцність на зсув та характер їх руйнування;
- різні методи зчеплення між шаром підсилення і перерізом елемента мають незначний вплив на їх міцність при зсуві, але позитивно впливають на їх міцність при згині;

- тристороннє підсилення перерізу елемента в порівнянні з іншими способами має вищий діапазон приросту міцності на вигин (максимум приросту міцності 81%–120%; підвищення тріщиностійкості на 300%–500%), так і на зсув (максимум приросту міцності 51%–80%; підвищення тріщиностійкості на 121%–180%).

1.2.3.1 Підсилення балкових залізобетонних конструктивних елементів шляхом збільшення їх перерізів в розтягувальній зоні з одного чи двох його боків за допомогою додаткового залізобетонного шару набетонування чи об'ємної сорочки із високоміцного розчину.

Науковці Mostosi S., Beschi C., Meda A. та Riva P. (2017) в роботі [59] дослідили експериментальну та аналітичну поведінку залізобетонних елементів, підсилених високоефективною оболонкою, встановивши її позитивний вплив на напружено-деформований стан, тріщиноутворення, жорсткість і несучу здатність конструкцій. Порівняння експериментальних результатів із розрахунковими моделями підтвердило можливість ефективного використання високоміцних композитних оболонок для модернізації та підсилення конструктивних елементів. Подальший розвиток цього напрямку представлено у роботі A. Meda, S. Mostosi та P. Riva (2014) [60], де досліджено підсилення залізобетонних балок методом оболонки з вискоексплуатаційного фіброармованого цементного композиту (HPFRCC). Експериментально встановлено, що застосування HPFRCC-оболонок забезпечує підвищення несучої здатності, обмеження розвитку похилих тріщин і покращення тріщиностійкості елементів, що підтверджує перспективність використання таких матеріалів для відновлення та посилення залізобетонних конструкцій.

Науковці A. P. Lampropoulos, S. A. Paschalis, O. T. Tsioulou та S. E. Dritsos (2015; 2016) в роботах [61, 62] дослідили підсилення існуючих залізобетонних балок із застосуванням ультрависокоміцного фіброармованого бетону (UHPFRC). У роботах розглянуто використання тонких підсилювальних шарів UHPFRC як ефективною альтернативи традиційному нарощуванню перерізу, що забезпечує високу міцність, тріщиностійкість, довговічність і покращену адгезію до

існуючого бетону. Експериментальні результати показали суттєве підвищення несучої здатності на згин, жорсткості та зменшення деформацій підсилених балок порівняно з контрольними зразками. Відзначається, що завдяки високим механічним властивостям UHPFRC можна зменшити товщину підсилювального шару та власну вагу конструкції, що особливо важливо при реконструкції й модернізації будівель і споруд.

Подальший розвиток досліджень підсилення залізобетонних балок із використанням UHPFRC представлено у працях М. А. Al-Osta, М. N. Isa, М. Н. Baluch, М. К. Rahman (2017) [63] та М. Safdar, Т. Matsumoto, К. Kakuma (2016) [64]. У зазначених роботах досліджено згинальну поведінку як підсилених, так і відремонтованих залізобетонних балок із застосуванням ультрависокоміцного фіброармованого бетону, який використовувався як підсилювальний або відновлювальний шар у розтягнутій зоні конструкції. Експериментально встановлено, що застосування UHPFRC забезпечує істотне підвищення несучої здатності, жорсткості, тріщиностійкості та пластичності елементів, а також сприяє зменшенню прогинів і ширини розкриття тріщин. Автори відзначають, що завдяки високій міцності, довговічності та здатності ефективно працювати у тонких шарах UHPFRC є перспективним матеріалом для реконструкції, ремонту та модернізації існуючих будівель і споруд.

Розширене досліджень у сфері ремонту та підсилення згинальних залізобетонних елементів, які пов'язані з оцінюванням роботи пошкоджених конструкцій при дії повторних навантажень і застосуванням високоміцних композитних матеріалів, було проведено Yehia A. Hassanean, К. А. Assaf, S. E. Abdel Raheem та А. N. Arafa (2012) в роботі [65], в якій експериментально досліджувалася поведінка відремонтованих залізобетонних балок із використанням бетонної сорочки зі сталевібробетону під дією короточасного повторного навантаження. Було встановлено, що введення сталевібро до складу підсилювального шару підвищує тріщиностійкість, жорсткість, енергоємність і довготривалу стійкість ЗБ конструкцій, а також сприяє

ефективнішому обмеженню розвитку пошкоджень у процесі циклічного навантаження.

Подібний напрям досліджень продовжено у роботі [66] науковцями P.R. Prem, A. Ramachandra Murthy, G. Ramesh, B. H. Bharkat Kumar та N. R. Iyer (2015), в котрій було вивчено згинальну поведінку пошкоджених залізобетонних балок, підсилених ультрависокоміцним бетоном. Отримані результати показали істотне відновлення несучої здатності, зменшення прогинів, підвищення жорсткості та покращення характеру руйнування порівняно з непідсиленими пошкодженими ЗБ елементами.

Окремі дослідження підсилення залізобетонних балок були пов'язані як із застосуванням високоміцних цементних композитів, так і з використанням полімерних композитних систем зовнішнього армування. Так, L. Hussein та L. Amleh (2018) в роботі [67] дослідили масштабний ефект у композитних балках із застосуванням ультрависокоміцного фіброармованого бетону (UHPFRC) при роботі на зсув. Установлено, що геометричні розміри елементів істотно впливають на механізм руйнування, розподіл напружень і несучу здатність, що є важливим для коректного проектування підсилених конструкцій різних типорозмірів. Отримані результати підтверджують перспективність використання UHPFRC як складової композитних систем підсилення залізобетонних елементів [67].

Подальший розвиток цього напрямку досліджень пов'язаний з оцінюванням роботи підсилених конструкцій за тривалої експлуатації та застосуванням сучасних методів моніторингу пошкоджень. Так, Z. Zhu, H. Abdelbaset, X. Li та Q. Tang (2023) в роботі [68] дослідили згинальну поведінку залізобетонних балок, підсилених ультрависокоміцним бетоном (UHPC), після тривалої дії навантаження. Установлено, що використання UHPC-шару забезпечує суттєве підвищення несучої здатності, жорсткості та тріщиностійкості елементів, а також зменшує негативний вплив повзучості й накопичених експлуатаційних деформацій на роботу конструкції.

Близький за тематикою підхід представлено P. R. Prem та A. R. Murthy (2016) у роботі [69], в якій досліджено згинальну поведінку залізобетонних балок,

підсилених УНРС-накладкою, із використанням методу акустичної емісії для контролю процесів тріщиноутворення та розвитку пошкоджень. Експериментальні результати показали істотне покращення міцності, жорсткості та енергоємності підсилених елементів, а застосування акустичної емісії дало змогу ідентифікувати стадії руйнування та оцінити ефективність підсилення в реальному часі. Узагальнюючи наведені дослідження [69], можна відзначити, що використання УНРС бетону у поєднанні з довгостроковими випробуваннями та сучасними засобами діагностики відкриває нові можливості для надійного ремонту, моніторингу й модернізації залізобетонних конструкцій.

У роботах [70, 71] проаналізовано сучасні підходи до підсилення залізобетонних балок і плит за згином та поперечною силою із застосуванням ультрависокоміцного бетону (УНРС). На основі узагальнення результатів експериментальних і теоретичних досліджень встановлено, що використання УНРС-шарів, оболонок або додаткових накладок забезпечує істотне підвищення несучої здатності, жорсткості, тріщиностійкості, довговічності та зниження деформативності конструктивних елементів. Відзначено, що завдяки високим механічним характеристикам матеріалу, його тріщиностійкості та надійному зчепленню з існуючим бетоном технології підсилення на основі УНРС є одним із найбільш перспективних напрямів модернізації, ремонту та реконструкції будівельних конструкцій.

У роботах [72, 73] узагальнено сучасний стан досліджень щодо підсилення залізобетонних балок за згином і поперечною силою із застосуванням високоефективних матеріалів - ультрависокоміцного бетону (УНРС) та композитів на основі волокнистих полімерів (FRP). У джерелі [72] проаналізовано особливості роботи балок, підсилених УНРС-шарами, та показано, що використання такого матеріалу забезпечує істотне зростання несучої здатності, жорсткості, тріщиностійкості й довговічності елементів завдяки високим міцносним характеристикам і надійному зчепленню з існуючим бетоном. У роботі [73] наведено сучасний огляд методів підсилення балок за допомогою FRP-композитів, де встановлено ефективність зовнішнього армування для підвищення

згинальної та зсувної міцності, зменшення деформацій і сповільнення розвитку тріщин. Відзначено, залежність від умов експлуатації, типу пошкоджень, вимог до довговічності та економічної доцільності. Загалом результати досліджень [72, 73] підтверджують перспективність застосування як UHPC, так і FRP-систем для реконструкції та модернізації існуючих залізобетонних конструкцій.

Поряд із вивченням за допомогою експериментальних досліджень міцності на згин підсилених ЗБ балок, важливими є числові дослідження граничних станів їх комбінованих перерізів. У цьому контексті S. Bahij і співавтори (2017) в роботі [74] провели числові дослідження зсувної поведінки ЗБ балок, які підсилені додатковими шарами із ультрависокоміцного бетону (UHPFRC), а в роботі [67] L. Hussein та L. Amleh (2018) встановили вплив масштабного фактору на роботу комбінованих ЗБ балок із UHPFRC. Отримані результати мають важливе значення для перенесення лабораторних даних на реальні конструкції різних типорозмірів.

Окремий напрям досліджень підсилення пошкоджених ЗБ балкових елементів за допомогою високоміцних матеріалів було проведено науковцями P. R. Prem і співавторами (2015) в роботі [66], в якій наглядно показано, що використання ультрависокоміцного бетону (UHPC) дозволяє істотно відновити несучу здатність пошкоджених балок, зменшити їх прогини та покращити загальний характер їх руйнування. Подальше продовження дослідження цієї тематики було проведено Z. Zhu і співавтори (2023) у роботі [68], в якій представлені результати, котрі доводять ефективність UHPC-підсилення для ЗБ балок, які були випробувані під навантаженням довготривалої дії. Застосування підсилення ЗБ балок шаром UHPC бетону дозволило зменшити в порівнянні з еталонними зразками вплив повзучості на загальну величину їх накопичених деформацій [68].

Комплексний підхід до вибору технологій підсилення представлено у роботі A. A. Abadel (2025) [75], де на основі експериментальних і числових досліджень порівняно різні способи підвищення згинальної міцності балок із самоущільнювального бетону (SCC). Автором показано, що ефективність підсилення залежить від конфігурації підсилювального шару, типу матеріалу, умов анкерування та вихідного технічного стану елемента, а поєднання

експерименту з числовим моделюванням дозволяє обґрунтовано обирати оптимальні рішення [75].

Також у роботі В. А. Tayeh, М. А. Abu Maraḡ та М. М. Ziara (2020) [76] досліджено згинальну роботу залізобетонних балок, підсилених методом нарощування перерізу із застосуванням самоущільнювального бетону (SCC) та сталевий зварної сітки. Результати випробувань показали суттєве підвищення несучої здатності, жорсткості, тріщиностійкості та зменшення прогинів порівняно з непідсиленими зразками. Встановлено, що використання цього підходу забезпечує якісне формування підсилювального шару та ефективну сумісну роботу нового й існуючого бетону, що робить метод перспективним для реконструкції та модернізації споруд.

Науковцями Х. Zhang і співавторами роботи [77] (2018) експериментально був встановлений вплив ступеня пошкодження та рівня попереднього навантаження на несучу здатність, жорсткість, тріщиностійкість і характер руйнування залізобетонних Т-подібних балок, які були підсилені методом нарощування перерізу у вигляді сорочки із застосуванням самоущільнювального бетону (SCC) за різних рівнів попереднього навантаження. Встановлено, що бетонна сорочка з SCC забезпечує істотне відновлення несучої здатності та підвищення жорсткості та покращення тріщиностійкості навіть при сильно пошкоджених перерізах конструктивних елементів. Отримані результати підтверджують доцільність застосування цього методу підсилення ЗБ балок не лише при реконструкції будівель та споруд зумовленої зміною величини зовнішнього навантаження, а й в умовах необхідності проведення ремонтних робіт, спричинених аварійним станом їх експлуатації [77].

Суттєвий інтерес становить використання нових матеріалів для тонкошарового підсилення ЗБ балкових конструктивних елементів методом бетонної сорочки. Так, науковцями W. Li та співавторами роботи [78] (2024) була досліджена поведінка ЗБ балок при згині, перерізи яких були підсилені тонким шаром високоміцного та високотріщиностійкого епоксидного розчину. Результати показали, що навіть за незначної товщини шару підсилення (набетонування)

значно збільшується приріст несучої здатності комбінованих ЗБ балкових конструкцій, зменшення ширини розкриття тріщин і покращення деформаційних їх характеристик, що відкриває можливості для малогабаритного підсилення в умовах обмеженого монтажного простору [78].

У роботах учених М. М. А. Alhadid та М. А. Youssef (2017) [79, 80] запропоновано аналітичну модель роботи залізобетонних балок, підсилених методом бетонної сорочки, з урахуванням сумісної роботи існуючого елемента та нарощеного шару в комбінованому перерізі. Досліджено вплив параметрів підсилення, властивостей матеріалів, армування та умов зчеплення між старим і новим бетоном на несучу здатність і деформативність комбінованої ЗБ конструкції. Запропонована модель може бути використана для інженерного розрахунку й оцінювання ефективності підсилення під час реконструкції балкових ЗБ конструкцій будівель і споруд.

Науковці М. У. Alkhateeb та F. Hejazi (2024) в роботі [81] досліджували комбінований метод підсилення залізобетонних балок на основі поєднання додаткової бетонної сорочки, стрижнів із CFRP та механічного їх анкерування. Встановлено, що сумісне використання традиційного нарощування перерізу і композитної арматури забезпечує підвищення несучої здатності, жорсткості, тріщиностійкості та енергоємності конструкцій. Показано, що додаткове механічне анкерування покращує передачу зусиль між перерізом існуючого елемента і новим шаром підсилення та запобігає передчасному його відшаруванню (руйнуванню) [81]. Автори відзначають перспективність цього підходу для модернізації й відновлення балкових конструктивних елементів будівель і споруд за умов їх експлуатації в агресивному середовищі та необхідності підвищення величини діючого зовнішнього навантаження.

Узагальнюючи наведені дослідження, можна відзначити, що застосування фібробетонів і високоміцних бетонних оболонок є ефективним напрямом ремонту, підсилення та продовження ресурсу експлуатованих будівель і споруд. Сучасні матеріали, зокрема суміші UHPC, UHPFRC, HPFRCC, сталеві фібробетон та епоксидні композиції, забезпечують не лише приріст несучої здатності, а й суттєве

обмеження ширини розкриття тріщин, зменшення прогинів і підвищення жорсткості елементів. Це особливо важливо для конструкцій, що працюють за змінних, циклічних або повторних навантажень, де вимоги до експлуатаційної придатності є не менш значущими, ніж гранична міцність.

1.2.3.2 Підсилення балкових залізобетонних конструктивних елементів шляхом збільшення їх перерізів в розтягувальній зоні на рівні нижньої грані за допомогою додаткового залізобетонного шару набетонування.

В наукових роботах [80, 82-88] представлені експериментально-теоретичні дослідження підсилення згинальних залізобетонних балок методом “partial jacketing”, який передбачає часткове улаштування додаткового армованого бетонного шару в нижній розтягувальній зоні перерізу елемента. В роботах були наведені результати випробувань ЗБ балок-зразків і підсилених під навантаженням, що дало змогу оцінити вплив нарощування перерізу на характер тріщиноутворення, прогини, жорсткість та граничну несучу здатність перерізів конструкцій. Експериментально встановлено підвищення згинальної міцності, зменшення деформацій і більш рівномірний розвиток тріщин у ЗБ балках з підсиленням перерізів у порівнянні з непідсиленими зразками. Окрему увагу в роботах було приділено забезпеченню сумісної роботи існуючого та нового бетону в комбінованих перерізах балок-зразків, зокрема впливу підготовки контактної поверхні, наявності анкерування додаткового шару та роботи арматури в зоні підсилення. Поряд із експериментальними результатами авторами окремих робіт була проведена чисельна оцінку НДС і несучої здатності підсилених елементів, яка підтвердила можливість використання розрахункових моделей для прогнозування роботи таких конструкцій. Отримані в роботах [80, 82-88] наукові результати стали важливою основою для подальших досліджень і практичного застосування методу збільшення площі перерізу в нижній розтягувальній зоні балкових ЗБ елементів при реконструкції, ремонті та модернізації будівель і споруд.

У роботі [89] науковцями I. A. E. M. Shehata, L. C. D. Shehata, E. W. F. Santos та M. L. F. Simões було досліджено міцність при згині залізобетонних балок,

підсиленних методом часткового нарощування перерізу за допомогою улаштування додаткового армованого бетонного шару в розтягнутій зоні. Експериментальні результати показали суттєве підвищення несучої здатності, жорсткості та тріщиностійкості конструкцій. Встановлено, що ефективність методу значною мірою залежить від якості зчеплення старого і нового бетону, підготовки контактної поверхні та надійного анкерування додаткового шару, що підтверджує доцільність застосування цього способу під час реконструкції та модернізації існуючих будівель і споруд.

1.2.3.3 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин балкових залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом збільшення площі їх перерізу одночасно з двох боків та нижньої його грані або тристоронніх оболонок.

Одним із ефективних способів підсилення ЗБ балкових конструктивних елементів є спосіб бокового їх підсилення із застосуванням тристоронньої схеми нарощування перерізу, при якій додатковий шар розташовується з двох боків та по нижній грані балки. Такий підхід дозволяє не лише підвищити жорсткість елемента, а й суттєво посилити розтягувальну зону комбінованого перерізу балкової конструкції та покращити загальну її роботу за складного комплексного напруженого стану. Одним із найбільш ефективних варіантів реалізації цього підходу є збільшення площі перерізу з двох боків та нижньої грані шляхом улаштування тристоронньої (U-подібної) залізобетонної оболонки. Така схема дозволяє одночасно підсилити розтягувальну зону, збільшити робочу висоту перерізу, підвищити жорсткість елемента, а також покращити його роботу за дією зовнішніх поперечних сил. На відміну від локального підсилення лише на рівні нижньої грані перерізів, тристороння оболонка забезпечує більш рівномірний розподіл напружень та надійніше включення нового матеріалу в спільну роботу з існуючим перерізом ЗБ балкової конструкції.

Вагомий внесок у розвиток напряму цього методу підсилення було зроблено у роботі М. А. Abu Mara^q, В. А. Tayeh, М. М. Ziara та R. Alyousef (2021) [90], в якій експериментально було досліджено поведінку залізобетонних балок,

підсиленних оболонкою із самоущільнювального бетону (SCC), армованою сталевною дріткою сіткою. Програма випробувань охоплювала різні конфігурації підсилення, що дало змогу оцінити вплив товщини оболонки, наявності армування та характеру контакту між старим і новим бетоном. Результати показали істотне підвищення граничного навантаження, зменшення прогинів і ширини розкриття тріщин, а також більш пластичний характер руйнування підсилених елементів. Авторами роботи [90] було відзначено, що використання шару SCC є особливо доцільним у густоармованих і важкодоступних зонах балкових конструктивних елементів будівель і споруд, де традиційне ущільнення бетону технічно зазнає ускладнення.

Подальший розвиток вище зазначеного наукового напрямку дослідження представлено у роботі [91] науковцями Tayeh B. A., Abu Maraqa M. A., Ziara M. M., & Shihada, S. (2020), в якій була вивчена робота при згині залізобетонних балок, перерізи яких були підсилені шляхом улаштування додаткових бетонних шарів знизу та з боків перерізу. Авторами експериментально було оцінено вплив різних схем підсилення на несучу здатність, жорсткість, тріщиностійкість і характер руйнування балкових ЗБ елементів. Встановлено, що нарощування перерізу забезпечує суттєве підвищення міцності на згин та зменшення прогинів порівняно з непідсиленими балками-зразками. Найбільший ефект зміцнення перерізів ЗБ балок досягається за умови сумісної роботи нового та існуючого бетону, належного армування додаткових шарів і якісної підготовки контактної поверхні. Отримані результати підтверджують ефективність застосування бетонних сорочок для підсилення ЗБ балок при модернізації, відновленні та реконструкції будівель і споруд, котрі пов'язані з підвищенням величин експлуатаційних навантажень.

Вплив застосування ультрависокоміцних бетонної і залізобетонної UHPC-оболонки при підсиленні перерізів балок із високоміцного бетону, які працюють на згин і зріз, був досліджений науковцями С. Li та Н. Aoude (2023) в роботі [92]. Авторами в роботі [92] при порівнянні результатів випробувань контрольних і підсилених ЗБ зразків був проаналізований вплив на їх несучу здатність різних конструктивних параметрів оболонки підсилення, зокрема товщина її додаткового

шара набетонування, конфігурація охоплення нею існуючого перерізу балки та особливості її армування. Експериментально встановлено, що застосування УНРС-оболонки забезпечує значний приріст несучої здатності, підвищення пластичності, затримку розвитку тріщин і зміну механізму руйнування в граничні стадії. Важливою перевагою застосування УНРС-оболонки із високими механічними характеристиками бетонної суміші чи розчину в порівнянні з іншими способами підсилення є можливість досягнення зменшення витрат матеріалів за рахунок меншої товщини додаткового шару підсилення при забезпеченні необхідної несучої здатності балкового ЗБ елемента, що підсилюється.

Подальший розвиток аналітичних підходів до оцінювання роботи підсилених конструкцій представлено у дослідженнях М. М. А. Alhadid та М. А. Youssef (2017) [79, 80], в яких розроблено модель розрахунку залізобетонних балок, підсилених бетонними оболонками, з урахуванням сумісної роботи старого і нового бетону, параметрів армування та характеристик контактної поверхні. Показано, що врахування міжшарового ковзання та реальної адгезійної взаємодії є необхідною умовою достовірного прогнозування жорсткості, несучої здатності та характеру руйнування підсилених елементів. Запропонований підхід є важливим підґрунтям для створення інженерних методик розрахунку таких систем підсилення.

В роботах [93, 94, 95, 96] А. В. Мазураком разом з співавторами були проведені експериментально-теоретичні дослідження міцності і деформативності залізобетонних балок, підсилених додатковими залізобетонними шарами, які були виготовлені за технологією торкретування. Досліджувалися залізобетонні балки-зразки, в яких додатковий залізобетонний шар підсилення з бетону чи розчину улаштувався з одного, двох чи трьох боків (сторін) їх перерізу, а перерізи окремих балок-зразків були підсилені додатковим шаром у вигляді замкнутої обойми чи сорочки. Запропоновані А. В. Мазураком і співавторами в роботах [93-96] способи підсилення ЗБ балок, які базуються на улаштуванні додаткових шарів чи оболонок підсилення за технологією торкретування, дозволяють підвищити згинальну та зсувну несучу здатність ЗБ балкових конструктивних елементів

перекриттів, їх жорсткість і тріщиностійкість залежно від конструктивних вимог і технологічних умов улаштування, що особливо важливо в умовах реконструкції, модернізації будівель (споруд) та обмеженої будівельної висоти їх перекриттів.

В роботах [97-100] Д. І. Дубіжанським у співавторстві з вітчизняними науковцями були проведені дослідження міцності на згин, деформативності та тріщиностійкості залізобетонних балок, підсилених залізобетонною обоймою при дії навантаження. Експериментальні дослідження склалися із 16-ти зразків-балок (I-IV серій). Аналіз виконаних експериментально-теоретичних досліджень показав, що інженерна методика діючим у той період норм, яка враховувала використання перерізу за допомогою розрахованих коефіцієнтів, давала змогу з необхідною точністю визначати міцність на згин балок, підсилених залізобетонною обоймою при дії експлуатаційного навантаження рівнем 0,7...0,9 від граничного короточасного зусилля, визначеного при випробуванні еталонних зразків-балок за серією I. Розбіжність між теоретичними і експериментальними величинами становила -3,7...-10,9% в бік заниження експериментальних величин над теоретичними. Було запропоновано інженерну методику розрахунку міцності на згин ЗБ балок, підсилених обоймою під навантаженням, згідно положень діючих у той час норм ДБН В.3.1-1-2002 із застосуванням підходів попередніх норм СНиП 2.03.01-84*, до якої запропоновано ввести корегуючі коефіцієнти використання перерізу обойми підсилення із бетону з додатковою арматурою.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що збільшення площі перерізу з двох боків та нижньої грані є одним із найперспективніших способів реконструкції балкових залізобетонних елементів. Поєднання сучасних матеріалів (SCC, UHPC) з удосконаленими розрахунковими моделями відкриває широкі можливості для підвищення міцності, жорсткості, тріщиностійкості та довговічності конструкцій. Аналіз наведених досліджень свідчить, що ефективність тристороннього підсилення визначається не лише міцністю нового матеріалу, а й комплексом конструктивно-технологічних чинників. До них належать якість підготовки поверхні існуючого бетону, забезпечення шорсткості контактної зони, використання анкерних елементів, раціональне розташування

армування та оптимальна товщина оболонки. Саме сумісна робота нового й старого матеріалу забезпечує повне використання потенціалу підсилення та стабільний характер роботи комбінованих перерізів ЗБ балки під навантаженням.

1.2.3.4 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин балкових залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом збільшення площі їх перерізу у верхній стисненій його зоні.

Спосіб підсилення верхньої стисненої частини перерізу ЗБ балки застосовують у разі недостатньої міцності бетону стисненої зони, втрати жорсткості конструкції або необхідності обмеження прогинів без втручання у нижню частину балкового конструктивного елемента. Одним із варіантів реалізації цього підходу є збільшення площі перерізу балкового елемента у верхній стисненій його зоні шляхом улаштування додаткового залізобетонного, бетонного або композитного шару зверху стисненої грані елемента. Такий спосіб доцільний у випадках недостатньої несучої здатності бетонної стисненої зони, втрати міцності верхнього шару бетону внаслідок експлуатаційних пошкоджень, а також за потреби підвищення жорсткості конструкції без значного втручання у нижню розтягувальну частину балки. Збільшення висоти стисненої зони дозволяє підвищити опір бетону стисканню в комбінованому перерізі ЗБ елемента, а також збільшити величину (плече) між внутрішніми зусиллями та зменшити деформації елемента під навантаженням.

Узагальнення сучасних підходів до такого виду підсилення наведено у роботі S. Bahij, S. Omary, F. Feugeas та A. Faqiri (2020) [101], в якій виконано огляд досліджень із використанням різних фіброармованих цементних матеріалів для ремонту та підсилення залізобетонних балок. Автори відзначають, що додаткові шари набетонування у верхній стисненій зоні перерізів ЗБ балок забезпечують приріст їх несучої здатності, підвищення жорсткості та покращення тріщиностійкості, особливо за умови використання матеріалів із підвищеною міцністю на стиск і тріщиностійкістю. У роботі [101] також наголошено, що ефективність конструктивного рішення у кожному випадку (варіанті) підсилення ЗБ балок залежить від сумісної роботи нового шару набетонування з існуючим

бетоном елементу на рівні їх контактної зони та її довготривале забезпечення за період експлуатації.

В публікації авторів E. Brühwiler, E. Denari'e (2008) [102] приведені три концепції застосування додаткового надміцного шару із фібробетону (UHPFRC) при нарощуванні перерізів балкового залізобетонного елементу у верхній стиснутій їх частині (дивись рис. 1.23): захисна функція без армування при відновленні верхнього захисного шару бетону елементу; захисна функція з армуванням шару із фібробетону при відновленні верхнього захисного шару бетону елементу; захисна функція та додаткове нарощування перерізу зверху додатковим армованим шаром із фібробетону, що дозволяє збільшити несучу здатність елементу.

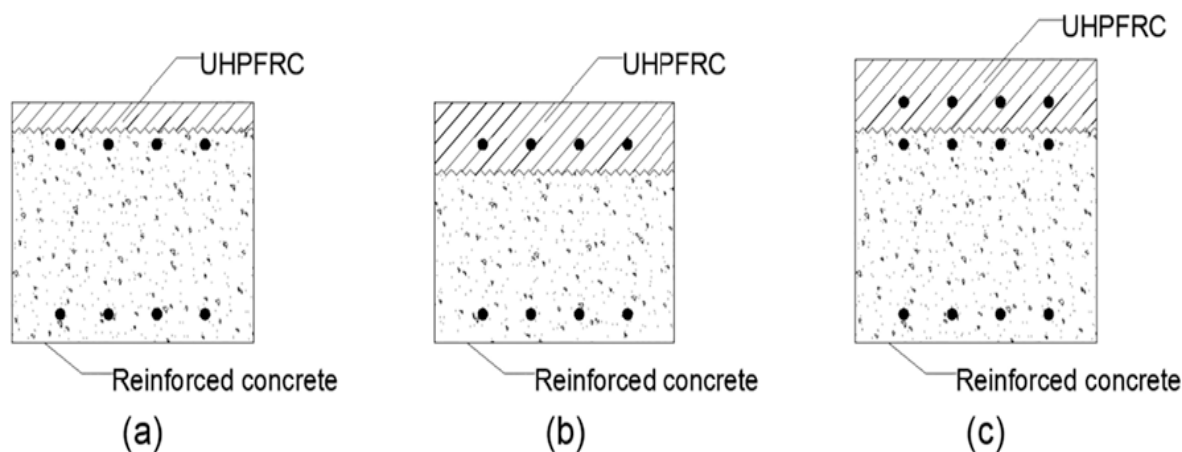


Рис.1.23 Концепції та принципи композитного конструктивного елемента, коли шар надміцного армованого бетону (UHPFRC) має захисну функцію, (a) без та (b) з вбудованою арматурою; та (c) коли UHPFRC використовується для зміцнення, забезпечуючи як захисну функцію, так і покращуючи структурну стійкість [102].

У роботі [70] науковці Y. Zhu, Y. Zhang, H. H. Hussein та G. Chen (2020) показали, що застосування тонких шарів набетонування із ультрависокоміцного бетону (UHPC) у верхній зоні ЗБ балок дозволяє значно підвищити їх міцність на згин, жорсткість і довговічність при мінімальному збільшенні власної ваги. Окремо авторами [70] підкреслено високу тріщиностійкість і корозійну стійкість УHPC бетону в шарах (оболонка, сорочках) підсилення ЗБ балок, що робить його

особливо перспективним матеріалом для реконструкції перекриттів та мостових конструкцій.

У роботах [103, 104] І. В. Задорожніковою були проведені експериментально-теоретичні дослідження міцності на згин та тріщиностійкості ЗБ балок, які були підсиленні в стисненій зоні перерізу шляхом улаштування додаткового залізобетонного шару набетонування із дрібнозернистого бетону, полімербетону чи сталевібробетону. Згідно результатів [86, 87], отриманих після проведення експерименту, несуча здатність усіх підсилених дослідних зразків збільшилася на 1,1...1,3 разів. Найбільше прирощення несучої здатності, у межах 24...26%, виявилось у балках підсилених шаром полімербетону, а найменше збільшення несучої здатності 13...17% - при підсиленні армованим дрібнозернистим бетоном. Найбільше підвищення тріщиностійкості у межах 34...40% спостерігалось у балках підсилених полімербетоном, на другому місці – балки підсилені сталевібробетоном, в яких підвищення становить 34...38 %, а найменше підвищення тріщиностійкості (менше 10%) було зафіксоване у балках-зразках, підсилених традиційним дрібнозернистим бетоном [103, 104].

Аналіз наведених праць свідчить, що ефективність підсилення у верхній стисненій зоні визначається не лише характеристиками нового матеріалу, а й правильним конструктивним рішенням. Важливими чинниками є товщина шару набетонування, спосіб з'єднання нового та старого бетону, наявність поперечного армування, сумісність деформацій і забезпечення рівномірної передачі напруження від стискаючого зусилля в комбінованому перерізі підсиленої ЗБ балки. Узагальнюючи результати досліджень, можна зробити висновок, що збільшення площі перерізу у верхній стисненій зоні є раціональним способом модернізації балкових конструкцій у випадках дефіциту стисненої зони або необхідності обмеження прогинів. Поєднання сучасних високоміцних матеріалів із аналітичними методами розрахунку створює передумови для подальшого вдосконалення технологій реконструкції та розроблення надійних інженерних рекомендацій для практичного застосування.

1.2.4 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин балкових залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом збільшення площі їх перерізу одночасно у верхній стисненій та нижній розтягувальній його зонах.

Комплексне (гібридне) збільшення площі перерізу одночасно у верхній стисненій та нижній розтягувальній зонах дає змогу раціонально використати резерви обох частин перерізу, забезпечуючи максимальний приріст несучої здатності, жорсткості та експлуатаційної надійності балки. Таке конструктивне рішення дозволяє цілеспрямовано впливати на обидві критичні частини перерізу ЗБ елементу: у верхній зоні підвищується опір стиску та жорсткість елемента, а в нижній - зростає здатність сприймати розтягувальні зусилля і підвищується тріщиностійкість. У результаті досягається комплексне зростання несучої здатності, зменшення прогинів і покращення експлуатаційної надійності конструкції.

У роботі [101] S. Bahij, S. Omary, F. Feugeas та A. Faqiri (2020) відзначають, що комбіноване розміщення підсилювальних шарів у верхній і нижній зонах ЗБ балкового конструктивного елемента забезпечує більш рівномірний розподіл напружень по висоті їх перерізу, ефективніше стримує розвиток тріщин і дозволяє досягти більшого приросту жорсткості порівняно з односторонніми (однобічними) конструктивними схемами підсилення.

Подальший розвиток концепції раціонального використання верхньої та нижньої зон перерізу відображено у дослідженні X. Tian, Z. Fang та Y. Shao (2025) [105], присвяченому згинальній поведінці попередньо напружених UHPC-балок. Хоча робота стосується нових конструкцій, отримані результати мають важливе методичне значення для підсилення існуючих елементів, оскільки демонструють ефективність одночасного керування роботою стисненої та розтягувальної зон для досягнення оптимальної міцності, пластичності та сприятливого механізму руйнування. Запропоновані авторами підходи до проєктування можуть бути адаптовані для задач реконструкції залізобетонних балок із двозонним підсиленням.

В роботах Ю. Ю. Зятюка і О. П. Борисюка [106, 107, 108, 109] наведено результати теоретико-експериментальних досліджень залізобетонних балок довжиною $L=2000$ мм, перерізом $b \times h=100 \times 200$ мм, із важкого бетону класу C15/20, які були підсилення одночасного в стиснутій зоні додатковим шаром із сталевібробетону з металевою фіброю, а в розтягнутій зоні – додатковими стрічками-композитами у вигляді вуглецевих волокон, що були приклеєні до нижньої грані на визначеній їх довжині $l=1700$ мм. Композитна стрічка Sika CarboDur S-512 шириною 25 мм, приклеювалась в нижній розтягнутій зоні конструкції по всій довжині прольоту та анкерувалась на приопорних ділянках однонаправленим полотном Sika Wrap. Приклеювання відбувалось за допомогою двокомпонентних клеїв: для стрічки Sikadur-30, а для полотна – Sikadur-330 [107]. Балки були армовані поздовжньою робочою стержневою арматурою $2\varnothing 10$ мм класу A500C та поперечною арматурою $\varnothing 6$ мм класу A240C з середнім кроком 50 мм, крім зони чистого згину. Армування перерізів балки у верхній зоні було здійснене арматурою із дроту $\varnothing 4$ Вр-I. Два зразка-балки були випробувані на дію короткочасного навантаження від центрально зосередженого на середині розрахункового прогону ($L_p=1700$ мм) зусилля, а 8-м наступних – на дію малоциклового навантаження (12-13 циклів до руйнування) з рівнем завантаження $\eta=0,3-0,6$ від руйнівного короткочасного зусилля для еталонного зразка,. Після випробування на малоциклові навантаження 6-ть ЗБ зразків-балок були додаткового підсиленні і потім повторно випробуванні на малоциклові навантаження. В результаті досліджень було встановлено наступне [106, 108]: несуча здатність підсилених залізобетонних балок вуглепластиковими матеріалами та сталевібробетоном на 47% та 56% була більша, ніж в непідсилених залізобетонних балок, випробуваних при дії одноразового навантаження, та на 60% - при малоциклових повторних навантаженнях балок-зразків; величини прогинів залізобетонних балок, підсилених вуглепластиковими матеріалами та сталевібробетоном, були на 48% меншими, ніж в непідсилених балках, випробуваних при дії одноразового навантаження, і на 50% - при повторних навантаженнях; ширина розкриття тріщин залізобетонних балок, підсилених

вуглепластиковими матеріалами та сталевібробетоном, на 26% менша, ніж в залізобетонних балок без підсилення, випробуваних при дії одноразового навантаження, і на 23% - при повторних малоциклових навантаженнях; момент тріщиноутворення у підсилених балках-зразках збільшився у два рази в порівнянні із зразками без підсилення.

У праці [75] А. А. Abadel (2025) представлені експериментально-числові дослідження різних конструктивних схем підсилення ЗБ балок, в якій розглянуто способи підвищення згинальної міцності балок із самоущільнювального бетону через різні конфігурації додаткових шарів і підсилювальних елементів. На основі випробувань та числового моделювання в роботі [75] було показано, що одночасне підсилення верхньої та нижньої зон є одним із найбільш результативних варіантів, оскільки забезпечує суттєве зростання граничного моменту, жорсткості та пластичності конструкції.

Аналіз наведених досліджень свідчить, що ефективність двозонного підсилення залежить від низки конструктивно-технологічних факторів. До них належать міцність і модуль пружності нового матеріалу конструктивних елементів підсилення ЗБ балок, співвідношення товщини верхнього та нижнього шарів набетонування (підсилення) по відношенню до існуючого їх перерізу, якість контактної поверхні, наявність поперечного армування та сумісність деформацій старого й нового бетону. Саме збалансована робота двох підсилених зон забезпечує максимальне використання резервів несучої здатності комбінованого перерізу балки.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що одночасне збільшення площі перерізу у верхній стисненій та нижній розтягувальній зонах є одним із найперспективніших способів модернізації балкових конструкцій. Поєднання сучасних матеріалів, експериментальних досліджень і числового моделювання створює підґрунтя для розроблення ефективних інженерних методик розрахунку і проектування конструктивних рішень з підсилення залізобетонних балкових конструктивних елементів перекриттів (покриття) існуючих будівель і споруд, які дозволять збільшити їх міцність на згин, жорсткість та довговічність.

1.3 Експериментальні та теоретичні дослідження міцності на згин плитних залізобетонних конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу.

В наукових роботах [110, 111] науковцями Р. Kankeř, S.S. Prakash і S.K.S. Pachalla були проведені експериментальні випробування, які присвячені дослідженню зміцненню перерізів залізобетонних багатопустотних плит, які були підсилені одночасно в стисненій і розтягувальній їх зонах за допомогою гібридного методу. Гібридного метод зміцнення пустотних плит в дослідженнях [110, 111] представляв собою підсилення їх перерізів одночасно в стисненій зоні за допомогою додаткового бетонного шару, товщиною $t=25$ мм; 50 мм; 75 мм, який улаштовувався на рівні верхньої їх площини, та в розтягувальній зоні – за допомогою додаткових поздовжніх елементів (полос, канатів, стержнів) із вуглепластика, скловолокнистих матеріалів, які закріплюються в перерізі на рівні нижньої їх площини в поздовжніх борознах чи ззовні за допомогою відповідно комбінованого епоксидного компаунду або цементно-полімерної клеючої суміші (розчину). Так в роботах [110, 111] в результаті експериментально-теоретичних досліджень було встановлено, що гібридний метод зміцнення пустотілих плит порівняно з їх індивідуальними схемами зміцнення збільшує їх несучу здатність на згин більш ніж на 100% без зниження їх пластичних властивостей, коли ж їх зміцнення за індивідуальними способами підсилення (тільки на рівні нижньої чи верхньої площини, або з одного чи двох боків перерізу) дозволяє підвищити міцність на згин тільки на 40...60% в порівнянні з еталонним конструктивним плитним елементом.

В науковій роботі [112] Steven Foubert провів експериментальні дослідження міцності на згин і зріз збірних багатопустотних плит з локальними наскрізними пустотами в прогоні, які були підсилені за допомогою методу NSM з використанням композитних матеріалів. Була розроблена експериментальна програма, яка включала одинадцять повномасштабних зразків-плит, що підлягали чотириточковій конфігурації завантаження. Основні параметри, що варіювалися, включали: коефіцієнт армування попереднього напруження; коефіцієнт посилення

CFRP та зміну розташування наскрізного отвору в прогоні конструкції. Результати експериментів показали, що посилення на згин попередньо напружених збірних багатопустотних плит за допомогою методу NSM-CFRP, дозволяє відновити їх несучу здатність в порівнянні з плитами без локальних пошкоджень [112].

Подальші наукові дослідження впливу наскрізних локальних отворів на поведінку попередньо напружених залізобетонних багатопустотних плит та ефективність улаштування додаткового армування, яке розташовується поблизу їх зовнішньої поверхні для зміцнення послаблених перерізів, провели Karam Mahmoud, Steven Foubert and Ehab El-Salakawy в роботах [113, 114]. Було випробувано п'ять повнорозмірних попередньо напружених залізобетонних пустотілих плит: одну без отвору, дві з отворами в різних місцях та дві з ідентичними отворами, посилені за допомогою стрічок з вуглецевого волокна (CFRP), встановлених поблизу поверхні. Плити випробовувалися на чотириточковий згин. Отвори вирізалися або в чистому згинальному прольоті, або в зсувному прольоті поблизу опори. Результати випробувань показали, що наявність отвору вздовж згинального прольоту або зсувного прольоту значно зменшила жорсткість та несучу здатність плити після розтріскування. Крім того, зміцнення отворів стрічками з вуглецевого волокна, встановленими поблизу поверхні, ефективно підвищило жорсткість після розтріскування, збільшило пластичність елемента, відновило дефіцит міцності на згин, що виник в результаті вирізання отворів, та забезпечило збільшення несучої здатності на згин [113, 114].

В роботі [115] S.K.S. Pachalla і S.S. Prakash провели дослідження поведінки багатопустотних плит з наскрізними локальними прорізами, перерізи яких були підсилені додатковими елементами із скловолокна (GFRP), які улаштовувалися на зовнішній їх поверхні за допомогою склеювання. Для оцінки впливу прорізів та ефективності застосування методу посилення елементами із скловолокна GFRP було випробувано десять повнорозмірних пустотних плит-зразків з наскрізними прорізами та без них, в яких змінними величинами розглядалися співвідношення зсувного прольоту до висоти перерізу (a/d) та місце розташування наскрізних прорізів. В результатів випробувань було встановлено, що наявність наскрізного прорізу знижує

міцність на згин плит з отвором в порівнянні з еталонних зразком-плитою без пошкодження приблизно на 43%, а підсилення плит з отворами за допомогою елементів із скловолокна GFRP відновлює їх міцність на згин до 87% від міцності контрольного зразка-плити без пошкодження перерізів.

В наукових роботах [116-121] були проведені експериментально-теоретичні дослідження міцності на згин і зріз, жорсткості і тріщиностійкості збірних залізобетонних багатопустотних плит з наявними локальними наскрізними прорізами, в яких послаблені перерізи були підсилені шляхом улаштування додаткових поздовжніх елементів (полос, канатів, стержнів) із сталі, вуглепластика, скловолокнистих матеріалів на рівні нижньої їх площини в поздовжніх борознах чи ззовні з закріпленням їх за допомогою комбінованого епоксидного компаунду або цементно-полімерної клеючої суміші (розчину). Результати випробувань показали, що метод зовнішнього підсилення послаблених перерізів плит за допомогою поздовжніх елементів із скловолокна GFRP є ефективним та економічно вигідним методом відновлення їх міцності на згин та жорсткості [116-121].

В статтях [122-125] О. Журавським та В. Тимощуком наведені результати експериментально-теоретичних досліджень плоских плит монолітних залізобетонних перекриттів, що підсилені зовнішньою напруженою арматурою. При підсиленні перерізів плоских плит додаткові напружені арматурні стержні розташовувалися ззовні в прольоті на рівні нижньої грані, а на ділянках перекриття поблизу опор із залізобетонних колон – на рівні верхньої їх грані. Програма експериментальних досліджень міцності і деформативності зразка у вигляді монолітної залізобетонної плоскої плити перекриття, розміром у плані $2,5 \times 2,5$ м, товщиною $t=25$ мм, з кроком колон 1×1 м, яка модельована 1:6 реальні розміри перекриття, була поділено на 3-и частини випробувань. Спочатку плита без попереднього напруження була поступово завантажена корисним навантаженням в 4-и етапи. Далі плита вже з попереднім напруженням арматури була випробувана з поступовим прикладенням навантаженням в 2-а етапи при рівнях зусилля $0,5N$ та N , на які була попередньо випробувана плита без підсилення. В четвертій частині випробувань плита-зразок з підсиленням у вигляді

попереднього напруження була поступово завантажена корисним навантаженням в 4-и етапи, яке розподілялося рівномірно по площі у взаємно-перпендикулярних напрямках прольотних ділянок плити. За результатами досліджень була встановлена ефективність застосування запропонованого методу підсилення плоских плит перекриття, яка дозволила підвищити їх жорсткість і міцність на згин при дії навантаження відповідного рівня в порівнянні з плитними ділянками перекриття без елементів підсилення.

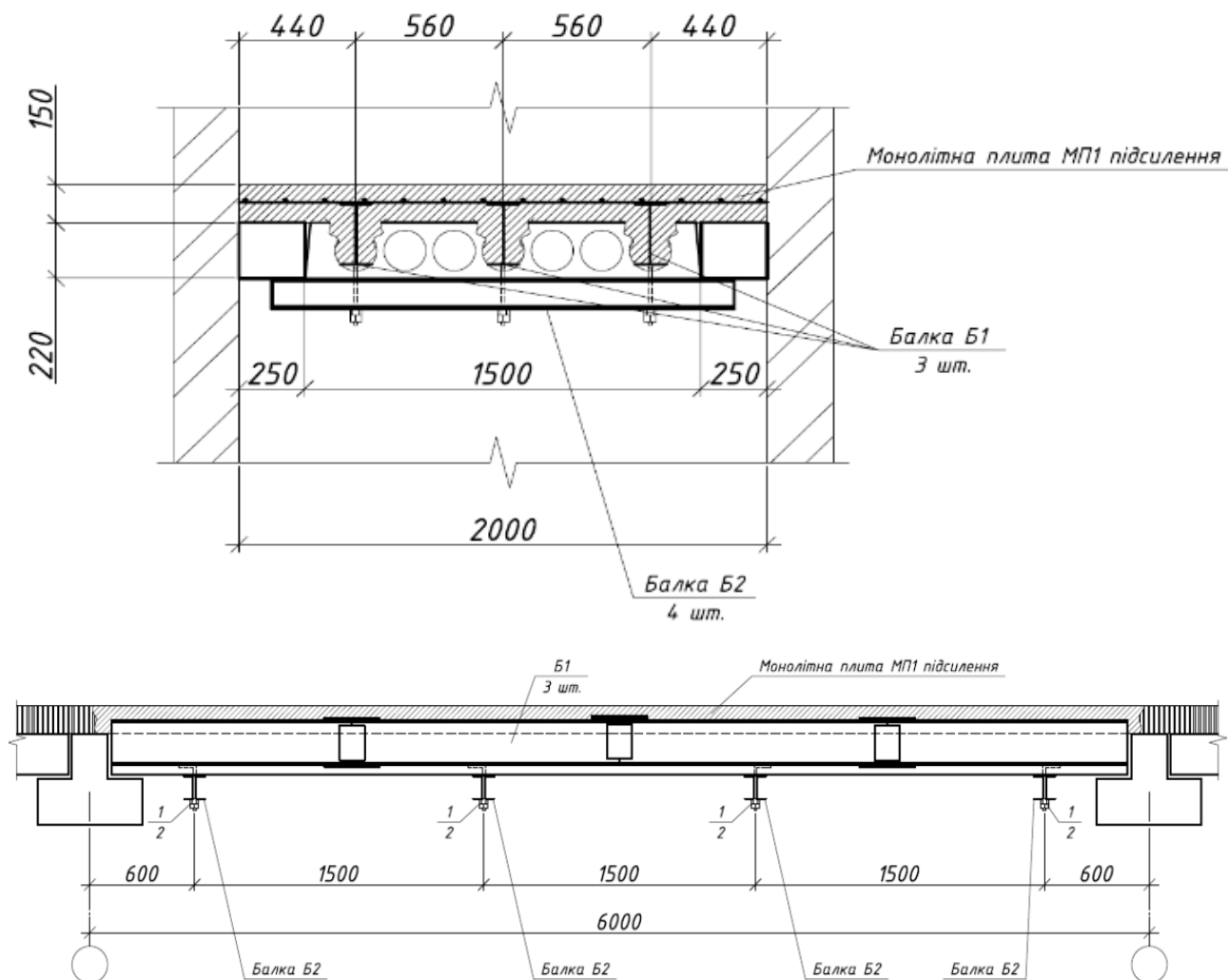


Рис. 1.24 Схеми підсилення перерізів збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття додатковими сталевими балками і монолітним залізобетонним шаром із фібробетону [126].

В практичній роботі [126] О. Скоруком запропоноване конструктивне рішення (див. рис. 1.24) з підсилення збірних залізобетонних багатопустотних плит перекриття будівлі шляхом нарощування їх перерізів в стисненій зоні за допомогою додаткового залізобетонного шару набетонування із фібробетону

(МП1) товщиною $t=150$ мм, а в розтягувальній зоні і на рівні висоти перерізу плит – шляхом улаштування сталевих балок Б1 (3 шт.) і Б2 (4 шт.) перерізом із прокатних гарячекатаних швелерів і двотаврів.

В статтях [127-131] О. Калмиковим та К. Бінкевичем у співавторстві з іншими науковцями наведені експериментально-теоретичні дослідження, які присвячені методу підсиленню плоских плит (панелей) перекриття в багатоповерхових житлових будинках панельного типу. Запропонований метод передбачає влаштування монолітного армованого шару бетону товщиною близько $t=50$ мм (надбетонки) на верхній поверхні плити та монтаж сталевих швелерів знизу, з'єднаних з плитою хімічними анкерами для забезпечення спільної роботи. Перед підсиленням плиту тимчасово розвантажують і вирівнюють домкратами. Після набору міцності надбетонки сталеві балки демонтуються, а плита працює як композитна конструкція з відновленою несучою здатністю. Натурні випробування гідростатичним навантаженням показали, що підсилені плити відповідають нормативним вимогам міцності та жорсткості, маючи прогини величиною до $f \leq 2$ мм при допустимих граничних їх значеннях $[f]=20$ мм. Метод дозволяє повністю відновити несучу здатність плит без їх демонтажу, прискорити і здешевити відбудову – економія становить близько 58% коштів порівняно з заміною плит, а також мінімально впливає на геометрію приміщень. Отримані результати в роботах [127-131] обґрунтовують доцільність широкого впровадження запропонованого методу підсилення плоских плит перекриття при масовій відбудові багатоповерхових будинків панельного типу, що зазнали руйнування внаслідок динамічних навантажень вибухового характеру.

В роботах [132-135] науковцями були проведені експериментальні та числові дослідження залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів, які були підсилені шляхом улаштування додаткових елементів із сталевих стрижнів та попередньо напружених сталевих канатів (тросів). Попередньо напружені канати дають змогу не лише підвищити міцність конструкцій, а й продовжити безаварійний термін їх експлуатації, забезпечуючи економічну доцільність проведення їх ремонту чи реконструкції. В роботі [132] науковцями Лі Х.Н.,

Wu G., Popal M.S. і Jiang J.B. було запропоновано два нові методи зміцнення багатопустотних плит за допомогою додатково улаштованих сталевих стрижнів та попередньо напружених сталевих дротяних канатів (P-SWR). Шість плит-зразків були випробувані при чотириточковому згинанні з метою дослідження впливу на їх міцність і деформативність способу підсилення за допомогою улаштування додаткових сталевих стрижнів та канатів P-SWR. Було встановлено, що завдяки попередньому напруженню сталеві канати P-SWR більш ефективно покращують тріщиностійкість зразків-плит, ніж улаштовані додаткові сталеві стрижні. Встановлення як внутрішніх, так і зовнішніх сталевих канатів P-SWR чи стержнів забезпечувало підвищення несучої здатності багатопустотних плит-зразків при згинанні. В роботах [134, 135] науковцями Д. Сморкаловим і В. Винокуром були запропоновані методи розрахунку і підсилення монолітних залізобетонних балкових і плитних конструкцій: метод підсилення конструктивних елементів за рахунок встановлення зовнішніх сталевих канатів за межами їх перерізів; метод підсилення конструкцій за допомогою встановлення попередньо напружених арматурних канатів (тяжів) з подальшим нарощуванням їх перерізу шляхом улаштування додаткових шарів із високоміцного бетону. Моделювання напружено-деформованого стану і процесу руйнування підсилених конструктивних елементів було здійснене в роботах [134, 135] з використанням програмних комплексів SCAD Office, LIRA-SAPR, SOFiSTiK, які дозволили провести точні розрахунки поведінки залізобетонних конструкцій з урахуванням складних факторів, включаючи нелінійність матеріалів, довготривалі ефекти, геометричну нестабільність, тощо. Як показали розрахунки, зовнішнє постнапруження підвищує несучу здатність конструкцій, мінімізуючи втручання в їх основну структуру, що важливо для оперативного ремонту критичних об'єктів інфраструктури.

Науковці України також внесли значний вклад в дослідження напружено-деформованого стану, міцності і деформативності залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів, які були підсилення в стисненій і розтягувальній зонах їх поперечного перерізу за допомогою додаткових сталевих і

полімерних елементів (полос, канатів, стержнів) та залізобетонних шарів набетонування. Так в роботах Барашикова А.Я. та ін. [136, 137], Мазурака А. В. та ін. [138], Хміля Р.Є, Бліхарського З.Я., Бліхарського Я.З., Титаренка Р., Копійки Н., Кліма А., Іванейка М. та ін. [139-145], Шмуклера В.С. та ін. [146], Ватулі Г.Л. та ін. [147, 148], Воскобійника П.П. та ін. [149], Бобала Т.В., Витака О.П. Якиміва Д. Ю. [150-152], Савйовського В. В., Молодіда О.С. [153, 154], Поповичем М.М. та ін. [155], Постернака О.М. і Постернака М.М. [156], Валового О.І. та ін. [157, 158] приведені результати теоретичних розробок, експериментальних випробувань і практичних рішень різних варіантів з підсилення і відновлення (ремонту) залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів будівель і споруд. Результати досліджень вітчизняних науковців, які були присвячені розрахунку і улаштуванню підсилення балкових конструктивних елементів за допомогою класичних способів, можуть бути використані для розробки проектної документації та при відновленні, реконструкції або капітальному ремонті будівель і споруд.

1.4 Висновки за першим розділом та формування мети і завдань досліджень.

В результаті аналізу переваг і недоліків різних варіантів способів підсилення балкових і плитних залізобетонних конструктивних елементів, які були отримані науковцями світу унаслідок експериментальних і теоретичних досліджень, були виділені ефективні варіанти способів їх підсилення шляхом нарощування перерізів та сформовані і обґрунтовані висновки щодо основних факторів впливу на їх міцність при згині та тріщиностійкість, а саме:

- одним із найбільш ефективних способів підсилення згинальних залізобетонних елементів є спосіб нарощування перерізу шляхом улаштування додаткового армованого бетонного шару. Даний метод забезпечує збільшення моменту опору, жорсткості та несучої здатності конструкції. Експериментальні дослідження підтверджують приріст несучої здатності від 30% до 90% залежно від схеми армування, товщини шару та якості зчеплення нового і старого бетону. Так тристороннє підсилення перерізів балкових залізобетонних

елементів в порівнянні з іншими способами має вищий діапазон приросту міцності на згин (максимум приросту міцності на згин становить 81%–120%, а підвищення тріщиностійкості збільшується в порівнянні з еталонними зразками на 300%–500%), а також і приріст міцності на зсув (максимум приросту міцності на зсув становить 51%–80%, а підвищення тріщиностійкості перерізів на 121%–180%);

- науковцями в дослідженнях було встановлено залежність міцності на згин та характеру руйнування елементів від наступних величин: співвідношення відстані від опори до зосередженого навантаження (a) і ефективної висоти перерізу елементу (d) (прогону зсуву $\lambda=a/d$); товщини шару нарощування перерізу (додаткового шару підсилення шляхом бетонування) (Δd); міцності бетону шару набетонування; наявності елементів зчеплення між шаром нарощування і основним перерізом елемента, що підсилюється. Так різні методи зчеплення між шаром підсилення і перерізом елемента мають незначний вплив на їх міцність при зсуві, але позитивно впливають на їх міцність при згині. Також різні способи (конфігурації) з підсилення (модернізації) перерізів мають значний вплив на момент тріщиностійкості елементів порівняно з максимальним моментом у випадку їх зміцнення на вигин;
- окремі наукові дослідження з підсилення перерізів залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів, які присвячені гібридного методу їх підсилення шляхом нарощування перерізів одночасно у нижній і верхній їх зонах, показали значну ефективність вище зазначеного методу в порівнянні з іншими методами підсилення, так як він поєднує в собі два і більше технологічні способи і конструктивні підходи. Так науковцями було встановлено, що гібридний метод зміцнення залізобетонних плитних елементів порівняно з їх індивідуальними схемами зміцнення збільшує їх несучу здатність на згин більш ніж на 100...120% без зниження їх пластичних властивостей, коли ж їх зміцнення за індивідуальними способами підсилення (тільки на рівні нижньої чи верхньої площини, або з одного чи двох боків

перерізу) дозволяє підвищити міцність на згин тільки на 40...60% в порівнянні з еталонним конструктивним елементом;

- узагальнення результатів наведених досліджень показує, що перспективи подальшого розвитку методів підсилення залізобетонних балок пов'язані з поєднанням експериментальних випробувань, числового моделювання та впровадження нових високоміцних композитних матеріалів. Подальшого опрацювання потребують питання розроблення універсальних інженерних методик розрахунку, оцінювання довговічності контактної зони, оптимізації геометрії підсилення та вибору раціональних технологічних рішень залежно від технічного стану конструкцій. Це створює наукове підґрунтя для вдосконалення практики реконструкції, модернізації та відновлення будівель і споруд.

З огляду літератури було встановлено, що при наявності чисельних наукових робіт одночасному підсиленню залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування їх перерізів у нижній і верхній зонах (див. рис. В.1, д) присвячено недостатня кількість досліджень. Також в положеннях п. 6.3.5 діючих норм ДБН Б В.3.1-2:2016 [1] відсутній варіант комбінованого підсилення балкових і плитних конструктивних елементів, який би передбачав одночасне підсилення їх перерізів в стиснутій і розтягнутій зонах. Тому для широкого запровадження в практику проектування способу підсиленню балкових і плитних залізобетонних елементів, що згинаються, шляхом одночасного нарощування перерізів в стисненій і розтягнутій зонах необхідно розробити методику їх розрахунку міцності на згин, яка б дозволяла визначити ефективні параметри додаткового армування в розтягувальній зоні залежно від товщини залізобетонного шару нарощування (d), прогону (L) і висоти перерізу елементу (h) з урахуванням наявної площі існуючого армування залізобетонного елементу до моменту підсилення, а також удосконалити існуючі методи розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових і плитних елементів, які підсилюються в розтягувальній зоні перерізів шляхом нарощування площі існуючого поздовжнього армування в

розтягувальній зоні їх перерізу за допомогою додаткових арматурних стержнів, які закріплюються (з'єднуються) з ними завдяки переривистим зварним швам.

Метою роботи є удосконалення теоретичних методів розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу, з урахуванням граничного напружено-деформованого стану їх компонентів та розробка типових рішень щодо їх запровадження в практику проектування.

Для досягнення мети були сформульовані та вирішені такі **основні завдання дослідження**:

- провести аналіз методів розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, переріз яких нарощується шляхом збільшення площі з різних його боків (сторін) під час підсилення існуючих конструктивних елементів перекриттів;
- провести аналіз результатів експериментальних досліджень міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилюються шляхом нарощування їх перерізів, які були проведені науковцями світу;
- удосконалити методику розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсилюються шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу за допомогою додаткових арматурних стержнів, які закріплюються (з'єднуються) до стержнів існуючого армування завдяки переривистим зварним швам;
- розробити методику розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів, які підсилюються шляхом нарощування перерізів з одночасним улаштуванням в них додаткового залізобетонного шару набетонування в зоні стиску та додаткового армування в зоні розтягу, в якій би враховувалися наявне армування їх перерізів та стадії граничного напружено-деформованого стану їх компонентів в момент руйнування;
- експериментально дослідити вплив різних факторів на міцність при розтягуванні та деформативність зварених внакладку окремих поздовжніх

арматурних стержнів складеного перерізу з різними конструктивними рішеннями, які утворюються при підсиленні залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу в розтягненій зоні, при дії на них зовнішнього зусилля, яке моделює стадію позацентрового розтягу робочої арматури в нижній зоні перерізів балкових елементів при згині чи при застосуванні в них попереднього напруження;

- результати досліджень впровадити у практику проектування і будівництва шляхом розроблення практичних методів розрахунку міцності на згин та проектування конструктивних елементів підсилення плитних і балкових залізобетонних конструкцій (елементів) перекриттів будівель і споруд.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ НА ЗГИН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЯКІ ПІДСИЛЕННІ ШЛЯХОМ НАРОЩУВАННЯ ПЕРЕРІЗУ

Метою наукових досліджень в розділі 2 є: узагальнення варіантів способів підсилення залізобетонних балкових конструктивних елементів шляхом нарощування їх перерізів; розробка та удосконалення аналітичних методів розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсиленні шляхом нарощування перерізу, з урахуванням напружено-деформаційного стану (НДС) їх компонентів, а саме: розробка метод розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу; розробка методу розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізів одночасно в стисненій і розтягувальній їх зонах; розробка методики розрахунку та проектування стандартних поперечних перерізів композитних згинальних залізобетонних елементів методом розрахункового опору залізобетону, які утворюються при їх підсиленні.

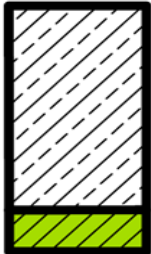
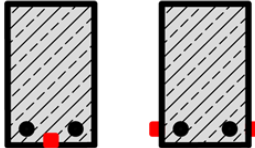
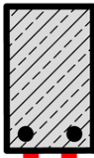
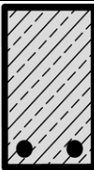
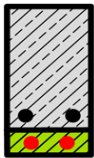
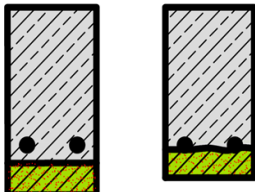
2.1 Класифікація варіантів способів підсилення залізобетонних балкових конструктивних елементів шляхом нарощування їх перерізів.

Згідно положень пп. 6.3, 6.4.1, 6.4.2 норм ДБН Б В.3.1-2:2016 [1] способами підсилення чи відновлення залізобетонних балкових конструктивних елементів є спосіб нарощування їх перерізів, який може здійснюватися в балкових і плитних елементах одним із варіантів: тільки збоку верхньої грані (стисненої зони перерізу); тільки збоку нижньої грані (розтягнутої зони перерізу); тільки збоку бічних граней перерізу; одночасно збоку трьох граней перерізу: нижньої і двох бічних; одночасно відносно верхньої і нижньої граней перерізу (в стиснутій і розтягнутій зонах). При нарощуванні перерізів балкових конструкцій, крім традиційних конструктивних елементів із сталевих прокату і монолітного бетону,

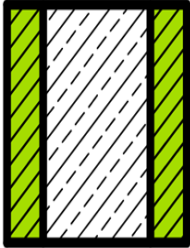
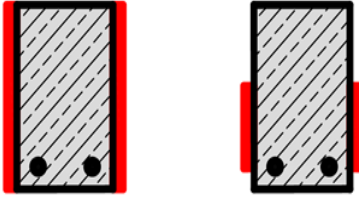
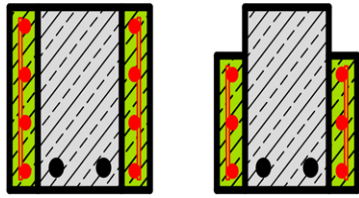
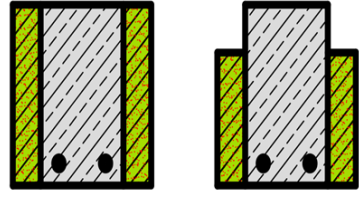
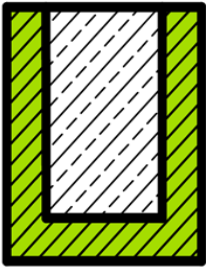
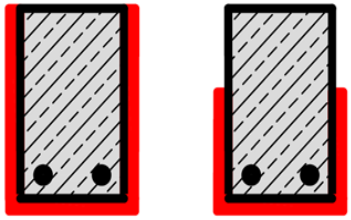
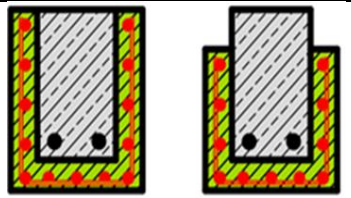
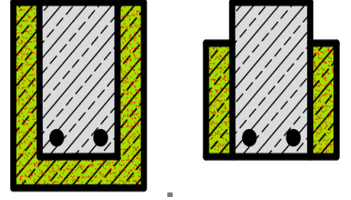
можуть використовуватися матеріали із скловолокна: арматурні стержні і полоси із тканини та додаткові шари із фібробетону, розчину та ін.

Відповідно положень пп. 6.3, 6.4.1, 6.4.2 норм ДБН Б В.3.1-2:2016 [1] було проведене узагальнення випадків та розроблена класифікація варіантів способів підсилення чи відновлення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів, яка приведена в таблиці 2.1.

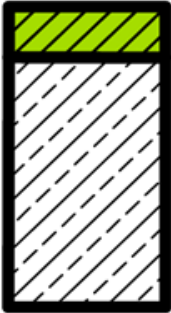
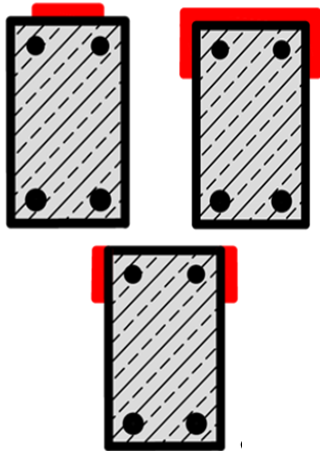
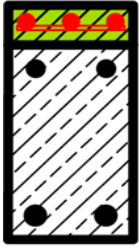
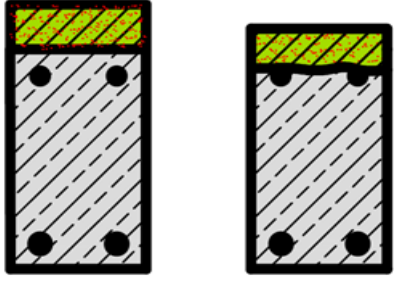
Таблиця 2.1 Класифікація варіантів способів підсилення чи відновлення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів

Спосіб додаткового підсилення перерізів конструктивного елементу та їх загальна схема	Варіанти розташування додаткових елементів підсилення по відношенню до перерізу балкового чи плитного залізобетонного конструктивного елементу	
	Варіант способу підсилення перерізів елементу	Загальна схема перерізу
1. Знизу нижньої розтягнутої зони перерізу елементу 	1.1. Додатковими повздовжніми арматурними стержнями в рівні висоти перерізу балки	
	1.2. Додатковими повздовжніми арматурними стержнями знизу перерізу балки	
	1.3. Додатковим повздовжнім металевим елементом з прокату чи іншого складеного перерізу знизу балки	
	1.4. Додатковим залізобетонним шаром знизу перерізу балки (армування окремими арматурними стержнями чи сітками)	
	1.5. Додатковим шаром фібробетону чи іншого матеріалу або неармованого розчину знизу балки чи на рівні перерізу балки	

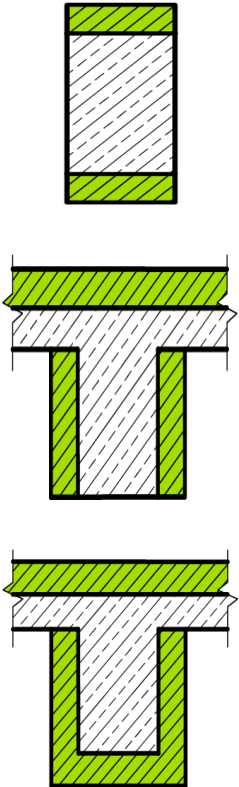
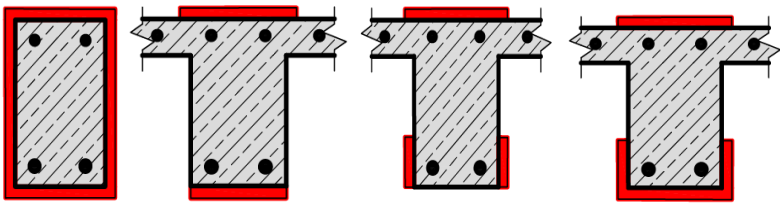
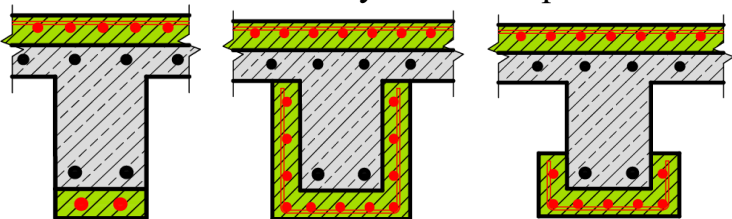
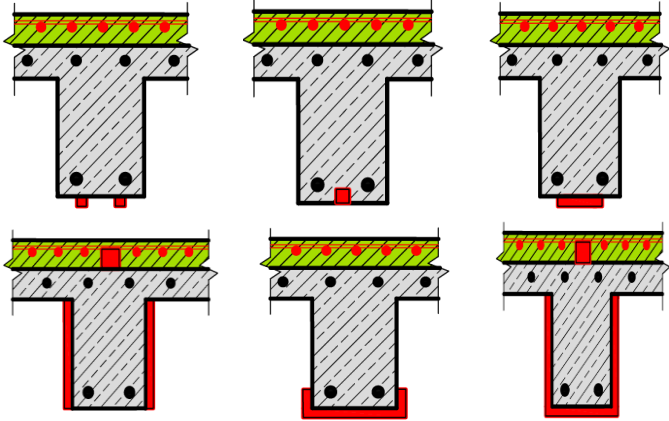
Таблиця 2.1 Класифікація варіантів способів підсилення чи відновлення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів (продовження)

Спосіб додаткового підсилення перерізів конструктивного елементу та їх загальна схема	Варіанти розташування додаткових елементів підсилення по відношенню до перерізу балкового чи плитного залізобетонного конструктивного елементу	
	Варіант способу підсилення перерізів елементу	Загальна схема перерізу
2. З двох боків чи з одного боку перерізу елементу 	2.1. Додатковими повздовжніми металевими елементами із прокату чи іншого складеного перерізу частково знизу чи на всю висоту перерізів	
	2.2. Додатковим залізобетонним шаром по довжині перерізів частково знизу чи на всю їх висоту	
	2.3. Додатковим шаром фібробетону чи іншого матеріалу або неармованого розчину частково знизу чи на всю висоту перерізів	
3. Знизу та з двох боків перерізу елементу 	3.1. Додатковими повздовжніми металевими елементами із прокату чи іншого складеного перерізу знизу та з двох боків частково чи на всю висоту перерізу	
	3.2. Додатковим залізобетонним шаром по довжині перерізів знизу та частково чи на всю їх висоту	
	3.3. Додатковим шаром фібробетону чи іншого матеріалу або неармованого розчину знизу та частково чи на всю висоту перерізів	

Таблиця 2.1 Класифікація варіантів способів підсилення чи відновлення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів (продовження)

Спосіб додаткового підсилення перерізів конструктивного елементу та їх загальна схема	Варіанти розташування додаткових елементів підсилення по відношенню до перерізу балкового чи плитного залізобетонного конструктивного елементу	
	Варіант способу підсилення перерізів елементу	Загальна схема перерізу
4. Зверху перерізу елементу чи на рівні верхньої стисненої його частини 	4.1. Додатковими повздожніми металевими елементами із прокату чи іншого складеного перерізу зверху чи зверху та з двох боків або тільки з двох боків на рівні верхньої стисненої частини перерізів, що підсилюються, частково на середині їх прогону чи на всю його довжину	
	4.2. Додатковим залізобетонним шаром зверху по довжині перерізів частково на середині їх прогону чи на всю його довжину	
	4.3. Додатковим шаром фібробетону чи іншого матеріалу або неармованого розчину зверху по довжині перерізів частково на середині їх прогону чи на всю довжину	

Таблиця 2.1 Класифікація варіантів підсилення чи відновлення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів (закінчення)

Спосіб додаткового підсилення перерізів конструктивного елементу та їх загальна схема	Варіанти способу підсилення та загальні схеми розташування додаткових елементів чи шарів нарощування по відношенню до перерізів балкового чи плитного залізобетонного конструктивного елементу перекриття
5. Комбінований спосіб: - одночасно зверху та знизу перерізу елементу; - одночасно зверху та з двох боків перерізу елементу; - одночасно зверху, з двох боків та знизу перерізу елементу 	5.1. Додатковими повздовжніми металевими елементами із прокату чи іншого складеного перерізу знизу та з двох боків частково чи на всю висоту перерізу 
	5.2. Додатковим залізобетонним шаром по довжині перерізів: зверху і знизу; зверху, знизу і з двох боків частково чи на всю висоту бокових граней 
	5.3. Додатковим залізобетонним шаром зверху по всій довжині перерізів та додатковими повздовжніми металевими елементами із арматурного чи листового прокату чи іншого складеного перерізу знизу чи з двох боків на всю висоту бокових граней, або одночасно знизу та двох боків перерізів елементів, що підсилюються 

2.2 Метод розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу.

Метод розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу, складається з рішень двох задач: визначення площі поперечного перерізу поздовжніх додаткових арматурних стрижнів, якими здійснюється підсилення, та перевірки міцності на згин залізобетонних балкових елементів, ними армованих.

Метод розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, що підсилюються додатковою поздовжньою арматурою під навантаженням, базується на таких критеріях, що описують їх граничний напружено-деформований стан у момент втрати міцності (дивись приклад напружено-деформованого стану залізобетонної балки, яка підсилена додатковими арматурними стрижнями в розтягувальній зоні під навантаженням, на рис. 2.1):

- для вирішення задачі вибору раціонального (оптимального) поперечного перерізу арматурних стрижнів A_{sd} , що використовуються для посилення залізобетонної балки, було прийнято критерій залежності граничних деформацій між крайніми волокнами стиснутої зони бетону та поздовжньо розтягнутою площею арматури A_c і A_{sd} :

$$A_s(\varepsilon_{cu}; \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}) + A_{sd}(\varepsilon_{cu}; \varepsilon_{sd} \leq \varepsilon_{sdy}) = A_{s,red} = \min, \quad (2.1)$$

де $A_{s,red} = A_s + A_{sd}$ – загальна площа арматурних стержнів, яка складається з площі стержнів, розташованих у розтягнутій частині розрахункового перерізу залізобетонної балки;

ε_{cu} – граничні відносні стискаючі деформації у верхніх волокнах стиснутої зони бетону розрахункового перерізу залізобетонної балки, які приймаються рівними $\varepsilon_{cu} = 0,0035$ (at $f_{cd} = 8 \dots 60$ МПа) або відповідно до вимог норм [159, табл. 3.1] чи [160] залежно від класу бетону;

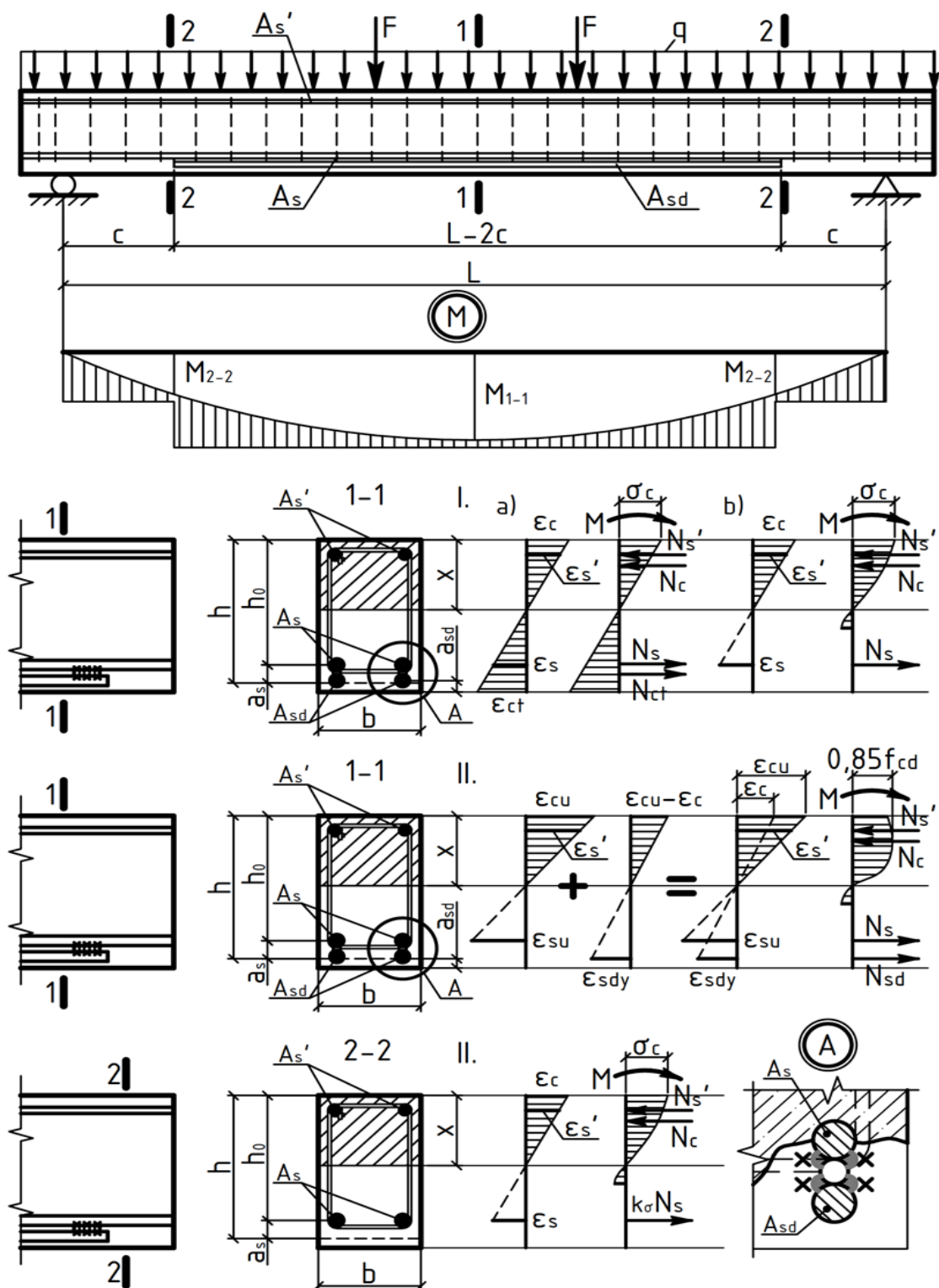


Рис. 2.1 – Напружено-деформований стан у розрахункових поперечних перерізах залізобетонної балки, яка посилена в розтягнутій зоні встановленням та зварюванням додаткової поздовжньої арматури A_{sd} до існуючого A_s під навантаженням ($q, \Sigma F$): етап I – розподіл деформацій та напружень у перерізах балки між вертикальними тріщинами (a) та у перерізі з вертикальною тріщиною (b) у зоні дії максимального згинального моменту (переріз I-I) у момент приварювання додаткової арматури; етап II – розподіл граничних деформацій та напружень у розрахунковому поперечному перерізі балки I-I у момент дії

максимального згинального моменту M_{1-1} ; етап II – розподіл деформацій та напружень у поперечному перерізі балки 2-2 (поблизу місця обриву поздовжньої додаткової арматури, що приварюється) у момент дії згинального моменту M_{2-2}

ε_{su} – граничні відносні деформації розтягу в арматурних стержнях, що армують розрахунковий переріз залізобетонної балки, значення яких приймаються рівними $\varepsilon_{su} \leq 0,005$ або згідно з вимогами норм [159, 160] залежно від типу та класу арматурної сталі;

ε_{sy} – граничні відносні деформації розтягу в арматурних стержнях, що підсилюють (армують) розрахунковий переріз залізобетонної балки, значення яких приймається як $\varepsilon_{sy} = f_y / E_s$ або за нормами [159, 160] залежно від класу арматурної сталі;

- для вирішення задачі перевірки міцності залізобетонної балки на згин були прийняті такі критерії граничного напружено-деформованого стану в її розрахункових перерізах:

для перерізу 1-1:

$$M_{1-1}(\varepsilon_{cu}; \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}; \varepsilon_{sd} \leq \varepsilon_{sdy}) = \max, \quad (2.2)$$

для перерізу 2-2:

$$M_{2-2}(\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}; \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}) = \max, \quad (2.3)$$

де M_{1-1} і M_{2-2} – максимальні значення згинального моменту відповідно в перерізах 1-1 та 2-2, які сприймає залізобетонна балка;

ε_s і ε_{sd} – відносні деформації в стрижнях розтягнутої арматури залізобетонної балки.

При розробці методики розрахунку міцності на згин залізобетонних балок, що підсилюються додатковою поздовжньою арматурою в розтягувальній зоні перерізів балки під навантаженням, були прийняті наступні передумови:

- у поперечному перерізі залізобетонної балки сталеві арматурні стрижні, що використовуються для посилення поперечних перерізів, мають жорсткі вертикальні та горизонтальні зв'язки по довжині з існуючими арматурними

стрижнями, що забезпечують їх взаємну роботу на граничній стадії руйнування балки;

- у момент руйнування залізобетонна балка може мати три випадки (*a*, *b* та *c*) граничного напруженого стану згину або зсуву, залежно від значень граничних деформацій бетону та поздовжньої арматури в розрахункових поперечних перерізах 1-1 та 2-2, а саме:

випадок a: пластична стадія руйнування балки під час згину, коли бетон руйнується в стиснутій зоні над вертикальною тріщиною в прогоні балки, а напруження в поздовжній арматурі досягають граничних значень у поперечному перерізі 1-1:

$$M_{1-1}(\epsilon_c = \epsilon_{cu}; \epsilon_{sy} < \epsilon_s \leq \epsilon_{su}; \epsilon_{sd} = \epsilon_{sdy}) = \max;$$

$$M_{2-2}(\epsilon_c < \epsilon_{cu}; \epsilon_s < \epsilon_{sy}) \neq \max;$$

випадок b: пластична стадія руйнування балки одночасно в перерізах зсуву та згину, коли бетон стиснутої зони над похилою та вертикальною тріщиною одночасно руйнується, а напруження в поздовжній арматурі досягають граничних значень у перерізах 1-1 та 2-2:

$$M_{1-1}(\epsilon_c = \epsilon_{cu}; \epsilon_{sy} < \epsilon_s < \epsilon_{su}; \epsilon_{sd} = \epsilon_{sdy}) = \max;$$

$$M_{2-2}(\epsilon_c < \epsilon_{cu}; \epsilon_s \geq \epsilon_{sy}) = \max.$$

випадок c: пластична стадія руйнування балки в поперечному перерізі, коли бетон руйнується в стиснутій зоні над похилою тріщиною на ділянках поблизу опор балки, а напруження в поздовжній арматурі досягає граничних значень у поперечному перерізі 2-2:

$$M_{1-1}(\epsilon_c < \epsilon_{cu}; \epsilon_{sy} < \epsilon_s < \epsilon_{su}; \epsilon_{sd} < \epsilon_{sdy}) \neq \max, \text{ або}$$

$$M_{1-1}(\epsilon_c < \epsilon_{cu}; \epsilon_s \leq \epsilon_{sy}; \epsilon_{sd} < \epsilon_{sdy}) \neq \max;$$

$$M_{2-2}(\epsilon_c < \epsilon_{cu}; \epsilon_s \geq \epsilon_{sy}) = \max;$$

- залежно від характеру руйнування залізобетонної балки, при визначенні її міцності на згин, приймаються випадки (*a*) та (*b*) граничного напружено-деформованого стану їх поперечного перерізу, які приведені на рис. 2.1;
- міцність бетону на стиск (N_c) у поперечному розрахунковому перерізі залізобетонної балки маємо можливість визначити, як для залізобетону, з

урахуванням відсотка його армування згідно з науковими пропозиціями, які наведені в роботах [161].

Послідовність розрахунку міцності на згин залізобетонних балок, які підсилюються додатковою поздовжньою арматурою в розтягувальній зоні їх перерізів під навантаженням:

- розрахунок площі поперечного перерізу додаткового армування (A_{sd}) визначається за формулою (2.4):

$$A_{sd} = (A_{s,red} - A_s) \times f_s / f_{sd}, \quad (2.4)$$

де: A_s – площа поперечного перерізу арматури розтягнутої зони балки, що підсилюється;

f_s, f_{sd} – відповідно розраховані розтягувальні опори існуючої та додаткової поздовжньої арматури балки, що підсилюється

$A_{s,red}$ – загальна зменшена площа поперечного перерізу розтягнутої арматури балки, яка визначається за формулою (2.5):

$$A_{s,red} = [B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}] / 2A, \quad (2.5)$$

Коефіцієнти А, В та С у рівнянні (2.5) визначаються згідно наступних залежностей (2.6...2.8) і (2.9...2.11):

- якщо $A_s' \neq 0$:

$$A_{s,red} = f_s^2 / (2bf_c); \quad (2.6)$$

$$B = f_s / [h_{0,red} + f_{sc} A_s' / (f_c b)]; \quad (2.7)$$

$$C = M_{1-1,red} + f_{sc} A_s' [f_{sc} A_s' / (2f_c b) - a_s' + 2h_{0,red}]; \quad (2.8)$$

- якщо $A_s' = 0$:

$$A = f_s^2 / (2bf_c); \quad (2.9)$$

$$B = f_s h_{0,red}; \quad (2.10)$$

$$C = M_{1-1,red}, \quad (2.11)$$

де: $M_{1-1,red}$ – максимальний розрахунковий момент, що діє в нормальному поперечному перерізі залізобетонного елемента;

f_c – розрахункова міцність бетону, з якого виготовлена залізобетонна балка, на стиск;

b – розрахункова ширина вздовж верхньої грані поперечного перерізу залізобетонної балки;

A_s' – розрахункова площа поздовжньої арматури, яка розташована в стиснутій зоні поперечного перерізу залізобетонної балки;

f_{sc} – розрахунковий опір арматури, яка розташована в стиснутій зоні поперечного перерізу залізобетонної балки;

a_s' – відстань від центру ваги поздовжньої арматури, яка розташована в стиснутій зоні поперечного перерізу залізобетонної балки, до її верхньої грані;

$h_{0,red}$ – робоча висота в розрахунковому поперечному перерізі залізобетонної балки, яка визначається:

- при попередньому розрахунку загальної приведеної площі поздовжнього армування $A_{s,red}$: $h_{0,red}=h_{0d}=h - a_{sd}$ – при розміщенні арматурних стрижнів A_{sd} у площі поперечного перерізу залізобетонної балки; $h_{0,red}=h_{0d}=h + a_{sd}$ – при розміщенні арматурних стрижнів A_{sd} поза площею поперечного перерізу залізобетонної балки;
- під час перевірного розрахунку міцність залізобетонної балки на вигин визначається за формулою (2.12):

$$h_{0,red} = \frac{h_{0d} f_{sd} A_{sd} + h_0 f_s A_s}{f_{sd} A_{sd} + f_s A_s};$$

$$h_{0,red} = (h_{0d} f_{sd} A_{sd} + h_0 f_s A_s) / A_{s,red}$$
(2.12)

коли $f_{sd}=f_s$, значення висоти $h_{0,red}$ можна визначити за формулою (2.13):

$$h_{0,red} = \frac{h_0 A_s + h_{0d} A_{sd}}{A_s + A_{sd}},$$
(2.13)

де $h_0, h_{0,d}$ – робоча висота поперечного перерізу елемента відповідно від центру ваги поперечного перерізу існуючої поздовжньої розтягнутої арматури A_s та додаткової A_{sd} до її крайньої стиснутої грані поперечного перерізу: $h_0 = h - a_s$;

$a_s; a_{sd}$ – відстань від центру ваги поздовжньої розтягнутої арматури A_s та A_{sd} , що розташована в зоні розтягу поперечного перерізу залізобетонної балки, до її нижньої грані.

Перевірку міцності на згин поперечних перерізів 1-1 залізобетонних балок на ділянках, посилених встановленням додаткової арматури в розтягнутій зоні, з урахуванням умов навантаження, здійснюємо за формулою (2.14):

$$M_{1-1,red} \leq f_c x_{red} \times (h_0 - x_{red} / 2) + f_{sc} A_s' \times (h_0 - a_s') + \sigma_{sd} A_{sd} \times (h_{0d} - h_0), \quad (2.14)$$

де x_{red} – висота площі стиснутої зони поперечного перерізу залізобетонної балки, яка визначається за формулою (2.15):

$$x_{red} = [\sigma_{su} A_s + \sigma_{sd} A_{sd} - f_{sc} A_s'] / (f_c b), \quad (2.15)$$

де σ_{su}, σ_{sd} – відповідно, напруження в основній (існуючій) та додатковій поздовжній арматурі залізобетонної балки, яка розташована в розтягнутій зоні її перерізу, визначаються за формулами (2.16)-(2.19):

якщо $\sigma_s + f_{sd} < \gamma_u \sigma_u$:

$$\sigma_{su} = \sigma_s + f_{sd}; \quad (2.16)$$

$$\sigma_{sd} = f_{sd}; \quad (2.17)$$

якщо $\sigma_s + f_{sd} \geq \gamma_u \sigma_u$:

$$\sigma_{su} = \gamma_u \sigma_u; \quad (2.18)$$

$$\sigma_{sd} = \gamma_u \sigma_u - \sigma_s; \quad (2.19)$$

де γ_u – коефіцієнт зниження межі міцності металу, що враховує умови експлуатації перерізу поздовжньої арматури після впливу на нього

електродугового зварювання, приймаємо $\gamma_u = 0,9$. В перерізах поздовжньої арматури, які не зазнали впливу електродугового зварювання, приймаємо коефіцієнт $\gamma_u = 1,0$;

σ_u – напруження в основній (існуючій) поздовжній арматурі балки на межі міцності;

σ_s – напруження в основній (існуючій) поздовжній арматурі балки в момент її зміцнення під дією згинального моменту від експлуатаційних та статичних навантажень (M_{exp}), яке визначається за формулами (2.20), (2.21):

при: $M_{\text{exp}} \leq M_{\text{crc}}$:

$$\sigma_s = \alpha_s M_{\text{exp}} / W_{pl}; \quad (2.20)$$

при: $M_{\text{exp}} > M_{\text{crc}}$:

$$\sigma_s = \psi_s M_{\text{exp}} / (A_s z), \quad (2.21)$$

де M_{crc} – момент, який сприймає поперечний переріз, перпендикулярний до поздовжньої осі елемента, під час утворення тріщин, який визначається за формулою (2.22):

$$M_{\text{crc}} = f_{\text{ctk}} W_{pl} \pm M_{rp}, \quad (2.22)$$

де: M_{rp} – згинальний момент відносно тієї ж осі, що й для визначення згинального моменту M_{exp} ; знак моменту визначається напрямком обертання (знак плюс "+" – коли напрямки обертання моментів M_{rp} і M_{exp} є протилежними; знак мінус "-" – коли напрямки збігаються);

W_{pl} – момент опору приведенного перерізу, перпендикулярного до поздовжньої осі елемента (балки), який визначається формулою (2.23):

$$W_{pl} = \frac{2(I_{b0} + \alpha I_{s0} + \alpha I'_{s0})}{h - x} + S_{b0}, \quad (2.23)$$

z – відстань від центру ваги площі поперечного перерізу основної (існуючої) поздовжньої арматури до точки прикладання еквівалентних сил у стиснутій зоні поперечного перерізу над тріщиною визначається за формулою (2.24):

$$z = h_0 \left[1 - \frac{\frac{h'_f}{h_0} \varphi_f + \xi^2}{2(\varphi_f + \xi)} \right], \quad (2.24)$$

де ξ – відносна висота стиснутої зони бетону;

φ_f – коефіцієнт, що визначається за формулою (2.25):

$$\varphi_f = \frac{(b'_f - b)h'_f + \frac{\alpha}{2\nu} A'_s}{bh}, \quad (2.25)$$

де ν – коефіцієнт, що характеризує пружно-пластичний стан бетону в стиснутій зоні;

ψ_s – коефіцієнт, що враховує роботу розтягнутого бетону в зоні з тріщинами та визначається за формулою (2.26):

$$\psi_s = 1,25 - \varphi_{ls} \varphi_m - 1 - \varphi_m^2 / \left[(3,5 - 1,8 \varphi_m) e_{s,tot} / h_0 \right], \quad (2.26)$$

де φ_{ls} – коефіцієнт, що враховує вплив тривалості навантаження;

$e_{s,tot}$ – ексцентриситет зусилля N_{tot} відносно центру ваги площі поперечного перерізу арматури A_s , A_{sd} , що визначається за формулою (2.27):

$$e_{s,tot} = \left| \frac{M}{N_{tot}} \right|, \quad (2.27)$$

де N_{tot} – рівнодіюча поздовжньої сили та попередньої сили стискання (при позацентровому розтягуванні поздовжня сила приймається зі знаком «-»);

$\alpha_s = E_s / E_c$ – коефіцієнт приведення напруження в арматурі до напруження в бетоні.

Перевірку міцності на згин в поперечному розрахунковому перерізі 2-2 залізобетонної балки, який перпендикулярний до її поздовжньої осі, в якому діє згинальний момент $M_{2-2,red}$, виконують на ділянці за місцем обриву додаткової арматури A_{sd} , яка використовується для її підсилення існуючої поздовжньої арматури A_s , за формулою (2.28):

$$\begin{aligned} M_{2-2,red} &= \gamma_u \sigma_s A_s z \leq M_{2-2}; \\ \sigma_s &= f_s / k_\sigma, \end{aligned} \quad (2.28)$$

де M_{2-2} – момент, що сприймає поперечний переріз 2-2 залізобетонної балки поблизу місця обриву (приварювання до основної) додаткової арматури, за допомогою якої виконується посилення, який визначається залежно від схеми навантаження елемента в момент дії на нього згинального моменту M_{red} ;

k_σ – коефіцієнт концентрації напружень, що враховує роботу поперечного перерізу поздовжньої арматури в зонах зміни її жорсткості (поперечного перерізу), приймається за результатами експериментальних дослідження, які приведені в розділі 4 роботи, для поперечних перерізів поблизу місць нарощування поздовжньої арматури, яка безпосередньо приварюється до основної за допомогою переривчастих зварних швів, рівним $k_\sigma = 1,6$; для поперечних перерізів поблизу місць зварення (з'єднання) додаткових арматурних стрижнів з поздовжніми існуючими арматурними стержнями балки за допомогою додаткових відрізків арматури - "коротких арматурних стрижнів" – приймаємо рівним $k_\sigma = 1,8$.

Розрахунок місця зварювання арматурного стрижня (відстань c від опори балки до краю (місця обривання) арматурних стрижнів A_{sd}) визначається за формулами (2.29) та (2.30):

- при з'єднанні стрижнів двосторонніми зварними швами довжиною $l_w = 4d$ (де d – діаметр меншого із арматурних стрижнів у зварному з'єднанні):

$$c = \left(\frac{M_{(2-2)}}{M_{(1-1)}} \times \frac{L}{2} \right) + 4d; \quad (2.29)$$

- при з'єднанні стрижнів одностороннім зварним швом довжиною $l_w = 8d$:

$$c = \left(\frac{M_{(2-2)}}{M_{(1-1)}} \times \frac{L}{2} \right) + 8d; \quad (2.30)$$

де d – діаметр меншого з арматурних стрижнів поздовжньої арматури залізобетонної балки, які з'єднуються між собою за допомогою зварювання.

В кінці розрахунку необхідно виконати порівняння значення граничного моменту $M_{1-1,red}$, яке отримане за залежністю (2.14), зі значенням згинального моменту (M) від дії зовнішнього навантаження, за умовою нерівності (2.31):

$$M_{1-1,red} \geq M. \quad (2.31)$$

При задоволенні умови (2.31) міцність на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі існуючого поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу за допомогою приварювання додаткових арматурних стрижнів, буде забезпечена.

2.3 Метод розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізів одночасно в стисненій і розтягувальній їх зонах.

2.3.1 Конструктивно-розрахункові схеми залізобетонних балкових елементів перекриттів, які підсилюються шляхом нарощування їх перерізів одночасно в стисненій і розтягувальній зонах.

Залізобетонні балкові елементи, що підсилюються, є несучими конструктивними елементами монолітного залізобетонного перекриття, перекриттів із збірних залізобетонних плоских чи ребристих плит перекриття. Розрахунковий переріз залізобетонних балкових елементів вище зазначених перекриттів має вигляд тавра. Так на рис. 2.2 і рис. 2.3 приведені відповідно конструктивно-розрахункові схеми для балкових і плитних елементів, що підсилюються шляхом одночасного нарощування перерізів в стисненій і розтягувальній зонах, монолітного залізобетонного перекриття та розрахункова схема їх перерізів, які працюють на згин.

Конструктивні та розрахункові схеми плитних та балкових залізобетонних елементів монолітного залізобетонного перекриття при його підсиленні шляхом одночасного нарізання перерізу у верхній стисненій і нижній розтягувальній зонах

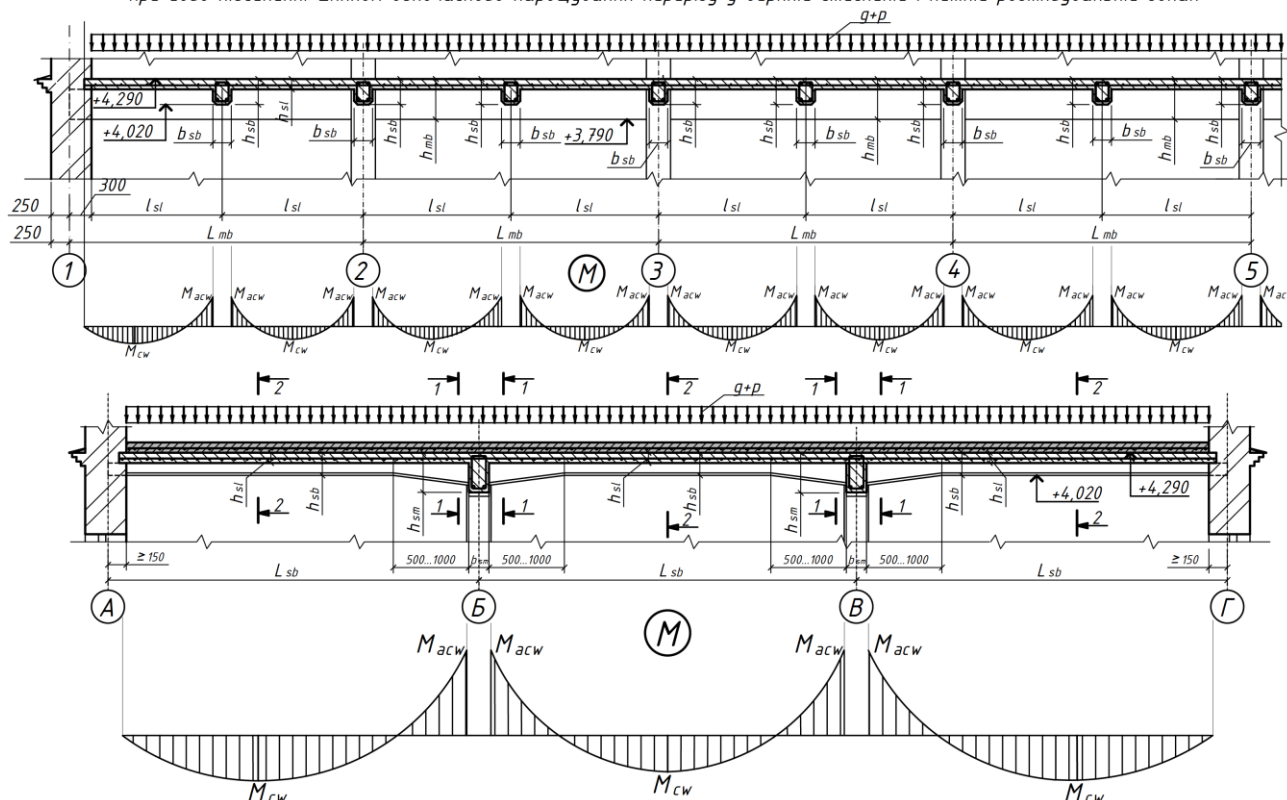


Рис. 2.2 Конструктивно-розрахункові схеми для балкових і плитних елементів, що підсилюються, монолітного залізобетонного перекриття

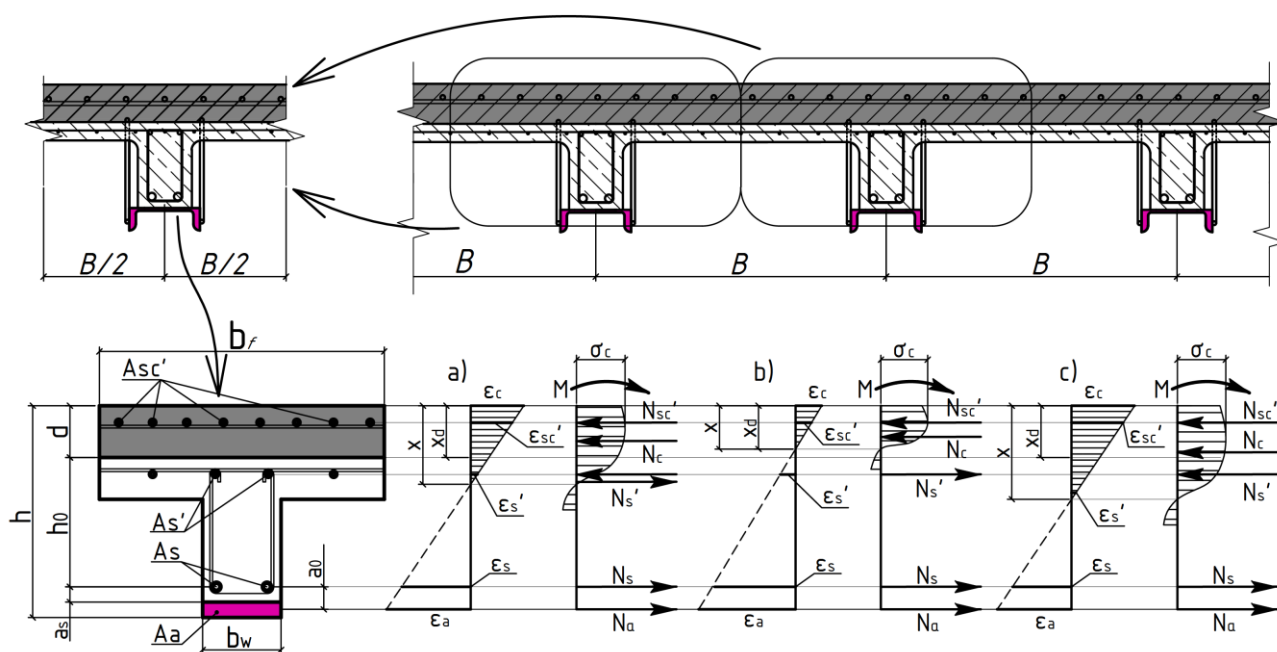


Рис. 2.3 Розрахункова схема перерізів, які працюють на згин, в балковому конструктивному елементі монолітного залізобетонного перекриття, що підсилюється шляхом одночасного нарізання перерізів в стисненій і розтягувальній зонах

На рис. 2.4 і рис. 2.5 приведені відповідно конструктивно-розрахункові схеми для балкового конструктивного елементу, що підсилюється шляхом одночасного нарощування перерізів в стисненій і розтягувальній зонах, залізобетонного перекриття із збірних ребристих плит та розрахункова схема перерізів їх поздовжніх ребер, які працюють на згин.

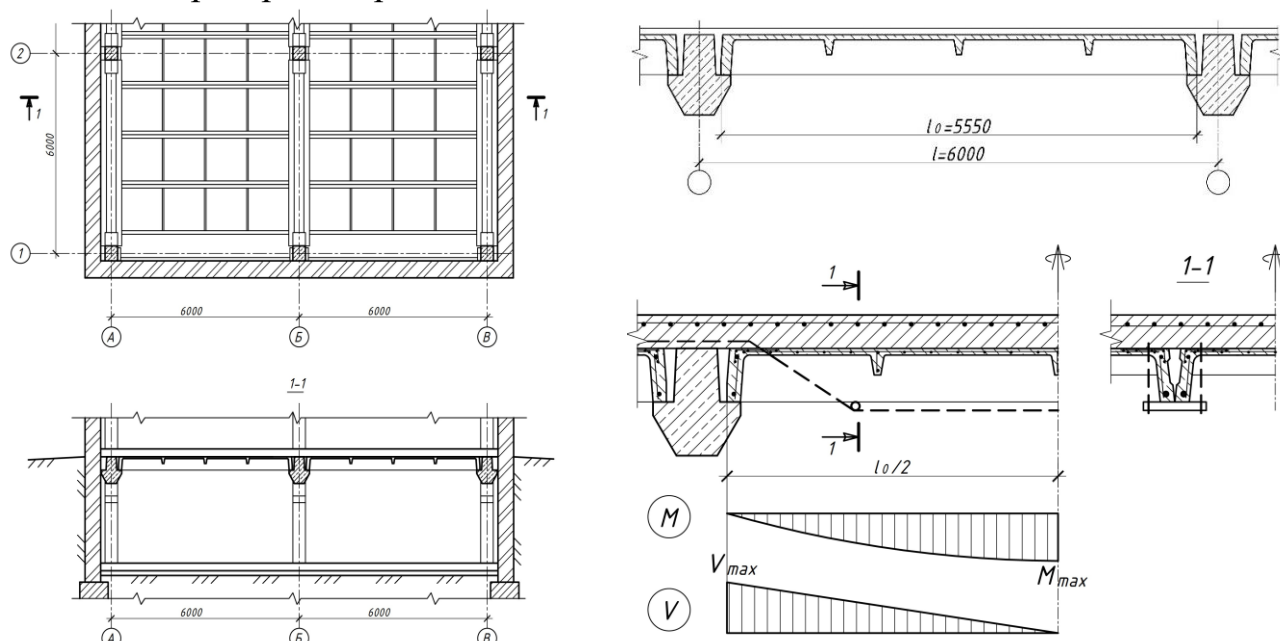


Рис. 2.4 Конструктивно-розрахункові схеми для балкового конструктивного елемента, що підсилюється, залізобетонного перекриття із збірних ребристих плит

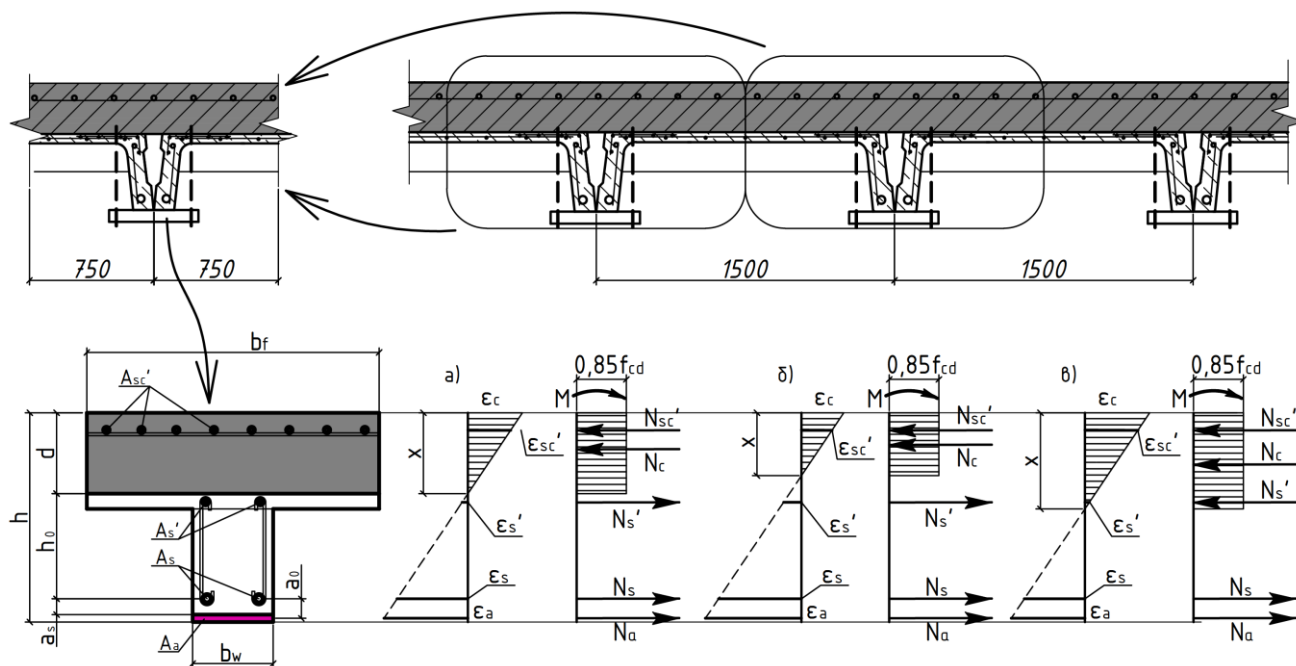


Рис. 2.5 Розрахункова схема перерізів, які працюють на згин, балкового конструктивного елемента, що підсилюється в перекритті із збірних

залізобетонних ребристих плит шляхом одночасного нарощування перерізів в стисненій і розтягувальній зонах

На рис. 2.6 приведено конструктивно-розрахункові схеми для балкового конструктивного елементу, що підсилюється шляхом одночасного нарощування перерізів в стисненій і розтягувальній зонах, збірно-монолітного залізобетонного перекриття із збірних плит з круглими пустотами та розрахункова приведена схема комплексних перерізів збірної залізобетонної плити перекриття, які працюють на згин.

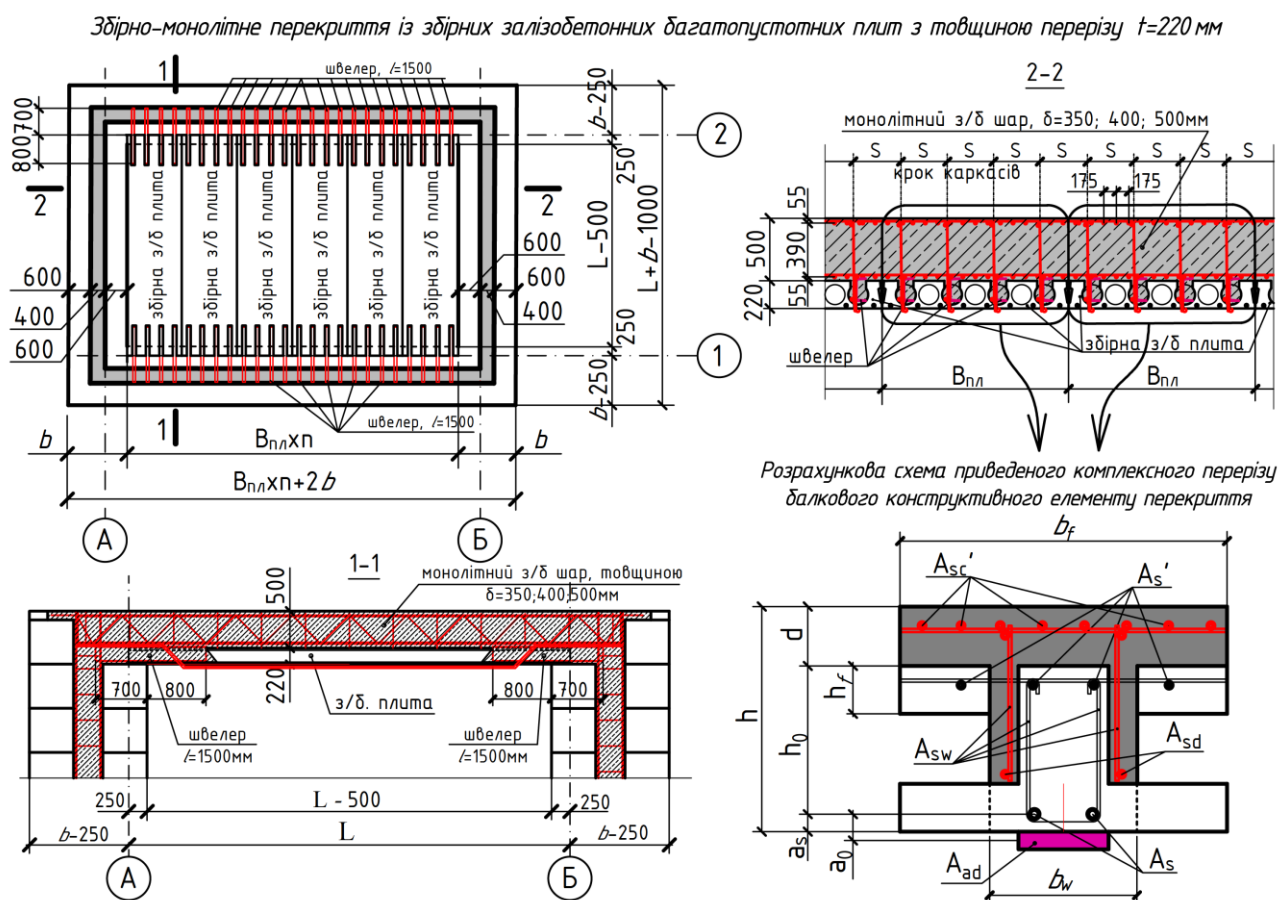


Рис. 2.6 Конструктивно-розрахункові схеми для балкового конструктивного елементу, що підсилюється шляхом одночасного нарощування перерізів в стисненій і розтягувальній зонах, збірно-монолітного залізобетонного перекриття із збірних плит з круглими пустотами з висотою перерізу $t=220$ мм та розрахункова приведена схема комплексних перерізів збірної залізобетонної плити перекриття, які працюють на згин: L – розмір прогону збірних плит перекриття з круглими пустотами в координаційних осях будівлі, м; b – товщина зовнішньої стіни будівлі; $B_{пл}$ – ширина перерізу збірної залізобетонної плити з круглими пустотами

Армування додаткового монолітного залізобетонного шару набетонування та збірних залізобетонних плит перекриття (покриття) здійснюється додатковими арматурними плоскими сітками і каркасами та арматурними стержнями на рівні нижньої грані їх перерізів.

2.3.2 Розрахунок міцності на згин перерізів залізобетонного балкового елемента перекриття, який підсилюється шляхом одночасного їх нарощування в стиснутій і розтягувальній зонах.

Міцність на згин в розрахункових перерізах залізобетонного балкового елемента перекриття, який підсилений одночасно нарощуванням стиснутої і розтягнутої зон їх перерізів, визначаємо відповідно залежності (2.32), яка є умовою рівноваги відносно рівнодіючої осі стисненої зони бетону (див. розрахункові схеми на рис. 2.3 і рис. 2.5):

$$M = f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_a \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f'_{sc} A'_{sc} \times (0,5x - a'_{sc}), \quad (2.32)$$

де M – максимальне значення згинального моменту від дії зовнішніх навантажень в розрахункових перерізах в зоні згину в прогоні залізобетонного балкового елемента, що підсилюється;

h_0 – робоча висота перерізу балкового залізобетонного елемента, що підсилюється;

f_s – розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм [159] залежно від її класу, якою виконане армування нижньої розтягувальної зони балкового залізобетонного елемента перекриття, що підсилюється;

f'_{sc} – розрахунковий опір на стиск поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм [159] залежно від її класу, якою виконується армування верхньої стисненої зони додаткового залізобетонного шару набетонування, яких здійснюється підсилення перерізів залізобетонного балкового елемента перекриття;

f_{sd} – розрахунковий опір на розтяг горизонтального елементу із арматурної сталі (A_{sd}) чи гарячекатаного прокату (A_{ad}), якими додатково здійснюється армування залізобетонного балкового елементу, що підсилюється в розтягувальній зоні перерізу, відповідно норм [162];

a_0 – відстань між геометричними горизонтальними осями існуючої поздовжньої арматури (A_s) і додатковим горизонтальним елементом із арматурної сталі (A_{sd}) чи гарячекатаного прокату (A_{ad}), яка приймається в рівнянні зі знаком «+» при $h_0 + a_0 \geq h_0$ та зі «-» знаком при $h_0 - a_0 < h_0$;

A_s – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, якими виконане армування в розтягувальній зоні перерізу балкового залізобетонного елементу, що підсилюється;

A_a – сумарна площа перерізу поздовжніх горизонтальних елементів із арматурної сталі (A_{sd}) чи гарячекатаного прокату (A_{ad}), якими додатково здійснюється армування залізобетонного балкового елементу, що підсилюється, в розтягувальній зоні його перерізу;

A'_{sc} – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, котрими здійснюється армування додаткового залізобетонного шару набетонування в стиснутій зоні перерізу балкового залізобетонного елементу перекриття, що підсилюється;

a_{sc}' – величина захисного шару бетону: відстань від геометричної горизонтальної осі поздовжньої арматури (A_{sc}') додаткового армування шару набетонування до верхньої його грані в комплексному перерізі балкового елементу;

x – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому комбінованому перерізі на ділянці плити, що сприймає навантаження від згинального моменту (M), яка визначається за залежністю (2.33):

$$x = (f_s A_s + f_{sd} A_a + f'_s A'_{sc}) / (f_{cl} b), \quad (2.33)$$

де f_{cl} – розрахунковий опір на стиск важкого бетону відповідно п.3.1 норм [159] залежно від його класу, із якого буде виготовлений

(улаштований) додатковий залізобетонний шар набетонування при підсиленні балкового залізобетонної елементу перекриття;

A_s' – сумарна площа поздовжньої арматури, якою виконане армування в стисненій зоні перерізу балкового елементу конструкції перекриття до його підсилення;

f_s' – розрахункова міцність на розтяг поздовжньої арматури (A_s'), якою виконане армування в стисненій зоні перерізу балкового елементу конструкції перекриття до його підсилення;

b – розрахункова ширина таврового перерізу залізобетонного балкового конструктивного елементу перекриття, яка приймається рівна величині $b=b_f$;

d - товщина додаткового залізобетонного шару набетонування при підсиленні залізобетонного балкового елементу шляхом нарощування його перерізів на рівні верхньої площини, яка визначається за залежністю (2.34).

2.3.3 Визначення максимальної товщини ($d_{\max}$) додаткового залізобетонного шару набетонування для системи перекриття, при якому буде забезпечуватися міцність на згин у розрахункових перерізах плитних ділянок на середині їх прогону при дії позитивного згинального моменту (M_{cw}) (див. розрахункову схему комплексного перерізу плитної ділянки на рис. 2.7,а).

Максимальна товщина ($d_{\max}$) додаткового залізобетонного шару набетонування, який улаштовується на рівні верхньої площини конструкції перекриття, визначається за рівнянням (2.34) при умові виконання вимог міцності на згин у розрахункових перерізах середнього прольоту його плитних ділянок, коли в них діє позитивний згинальний момент M_{cw} (див. схему на рис. 2.2):.

$$d_{\max} = \frac{M_{cw}}{f_s A_{s,sl}} - 0,5x_{sl} - h_0, \quad (2.34)$$

де M_{cw} – позитивний згинальний момент, що діє в середині прольоту плитного елемента монолітного залізобетонного перекриття;

f_s – розрахункова міцність на розтяг поздовжньої арматури, розміщеної в нижній розтягнутій зоні плитних ділянок існуючої конструкції перекриття, що підсилюється;

$A_{s,sl}$ – сумарна площа поперечного перерізу поздовжньої арматури, яким виконано армування в нижній розтягувальній зоні плитних ділянок існуючої конструкції перекриття, які мають розмір по ширині рівний одному метру ($b_{sl}=1$ м);

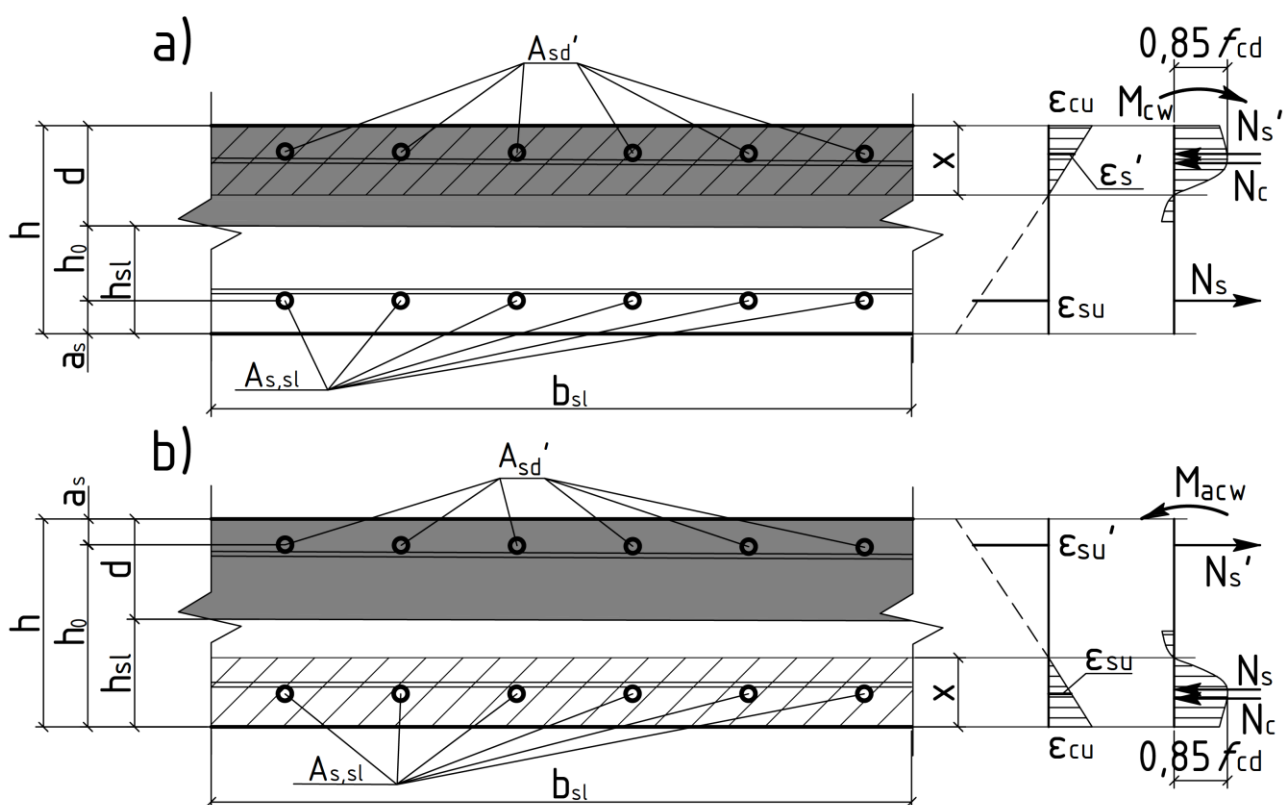


Рис. 2.7 Випадки напружено-деформованого стану комбінованого поперечного перерізу плитної ділянки конструкції перекриття, посиленого збільшенням поперечного перерізу додатковим шаром залізобетону в стиснутій зоні: а) під дією позитивного згинального моменту (M_{cw}) у поперечному перерізі; б) під дією негативного згинального моменту (M_{acw}) у поперечному перерізі

h_0 – ефективна висота поперечного перерізу на середині прольоту плитних ділянок існуючої конструкції перекриття, що підсилюється, яку визначаємо за виразом (2.35):

$$h_0 = h_{sl} - a_s; \quad (2.35)$$

x_{sl} – висота стисненої зони поперечного перерізу плитної ділянки на середині прольоту, величину якої визначаємо відповідно до рівняння (2.36):

$$x_{sl} = \frac{f_s \times A_{s,sl}}{f_{cd} \times b_{sl}}, \quad (2.36)$$

де f_{cd} – розрахункова міцність бетону на стиск у додатковому залізобетонному шарі набетонування товщиною (d), за допомогою якого здійснюється підсилення поперечного перерізу конструкції перекриття;

h_{sl} – загальна висота (товщина) поперечного перерізу існуючої плитної ділянки конструкції балкового перекриття на середині її прогону.

2.3.4 Визначення необхідної площі армування в додатковому залізобетонному шарі набетонування комплексного перерізу плитної ділянки конструкції перекриття, в якому буде забезпечуватися міцність на згин при дії в ньому позитивного згинального моменту (M_{acw}) (див. розрахункову схему комплексного перерізу плитної ділянки на рис. 2.7,б).

Необхідну площу армування (A'_{sd}) додаткового залізобетонного шару перекриття в розрахунковому перерізі плитної ділянки конструкції перекриття заданої ширини (b_{sl}) визначаємо за допомогою виразу (2.37) при забезпеченні в них умови міцності на згин під час дії в них від'ємного згинального моменту (M_{acw}):

$$A'_{sd} = \frac{M_{acw}}{0,8 \times f_{sd} \times (h_{sl} + d)}, \quad (2.37)$$

де M_{acw} – величина негативного згинального моменту, що діє в комплексному перерізі плитної ділянки конструкції перекриття;

f_{sd} – розрахункова міцність на розтяг поздовжньої арматури, якою армування додаткового шару набетонування товщиною (d) у комплексному поперечному перерізі плитного елементу конструкції перекриття.

2.3.5 Визначення необхідної площі додаткового армування (A_a) в розтягувальній зоні комплексного перерізу балкового елементу конструкції перекриття при забезпеченні умов міцності на згин при дії в ньому позитивного згинального моменту (M_{cw}) (див. розрахункові схеми комплексного перерізу балкового конструктивного елементу на рис. 2.2, рис. 2.3 і рис. 2.5).

Необхідну сумарну площу поперечного перерізу додаткового армування (A_a) в розтягувальній зоні комплексного перерізу балкового елементу конструкції перекриття (A_a) визначаємо за рівнянням (2.38):

$$A_a = \frac{f_c b}{f_{sd}} \times (-2M + f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x_H) - (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x_H) \times (1 \pm d \pm a_0 - 0,5x_H)); \quad (2.38)$$

де x_H – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому перерізі балкового елементу перекриття до його підсилення (без елементів (компонентів) його підсилення) при армуванні його тільки існуючими арматурними стержнями в розтягнутій зоні загальною площею A_s , яка визначається за залежністю (2.39) за умови рівноваги внутрішніх зусиль на горизонтальну вісь балкового елементу:

$$x_H = (f_s A_s) / (f_c b). \quad (2.39)$$

Розрахунок величини сумарної площі додаткового армування (A_a) балкового елементу конструкції перекриття, що підсилюється, відповідно залежності (2.38) не завжди буде оптимальний (ефективний з економічної точки зору), тому що в окремих випадках при нарощуванні перерізу шляхом набетонування встановлення додаткового армування в розтягнутій зоні перерізу може бути непотрібне, бо для міцності на згин буде достатньо вже існуючої в комплексному перерізі площі існуючого армування (A_s). Тому для удосконалення методики розрахунку компонентів підсилення був запропонований додатковий коефіцієнт (n), який буде враховувати відношення площ армування A_a до A_s .

$$n = A_a / A_s. \quad (2.40)$$

Величину коефіцієнта (n) визначаємо за залежностями (2.41)-(2.43):

$$0,5x_H \cdot n^2 + (h_0 + d \pm a_0 + x_H) \cdot n + (h_0 + d + 0,5x_H - \frac{M}{f_s A_s}) = 0; \quad (2.41)$$

$$D = (h_0 + d \pm a_0 + x_H)^2 - 4 \times 0,5x_H \times (h_0 + d + 0,5x_H - \frac{M}{f_s A_s}); \quad (2.42)$$

$$n_{1,2} = \frac{-(h_0 + d \pm a_0 + x_H) \pm \sqrt{D}}{x_H}. \quad (2.43)$$

При значенні коефіцієнта $n \leq 0$ підсилення залізобетонного балкового елемента конструкції перекриття одночасно шляхом нарощування перерізу в стиснутій і розтягнутій зонах непотрібне, буде достатньо виконати підсилення елемента тільки в стисненій його зоні шляхом улаштування додаткового залізобетонного шару набетонування.

При значенні коефіцієнта $n > 0$ необхідну площу перерізу додаткового армування (A_a) в розтягувальній зоні комплексного перерізу балкового елемента конструкції перекриття, що підсилюється, можемо визначити за залежністю (2.44):

$$A_a = (n + 0,1) \times A_s. \quad (2.44)$$

Величину необхідної площі армування (A'_{sc}) додаткового залізобетонного шару набетонування в комплексному перерізі балкового елемента конструкції перекриття визначаємо за залежністю (2.45) при $x < d$ та залежністю (2.46) при $x > d$ за умови рівноваги при забезпеченні умов міцності на згин відносно рівнодіючої осі існуючого поздовжнього армування (A_s) в його розтягувальній зоні:

при $x < d$:

$$A'_{sc} = \frac{M - f_{c1} b x \times (h_0 + d - 0,5x)}{f_{sc} \times (h_0 + d - a'_{sc})}; \quad (2.45)$$

при $d + a'_s < x \leq d + h_f$:

$$A'_{sc} = \frac{M - f_{c1} b d \times (h_0 + d / 2) - f_c b (x - d) \times (h_0 - (x - d) / 2) - A'_s f'_s (h_0 - a'_s)}{f_{sc} \times (h_0 + d - a'_{sc})}, \quad (2.46)$$

де a'_s – величина захисного шару бетону: відстань від геометричної горизонтальної осі існуючої поздовжньої арматури (A'_s) до верхньої грані перерізу

балкового елементу без компонентів його підсилення (без верхнього шару набетонування).

При величині площі армування верхньої стиснутої зони менше нуля ($A'_s \leq 0$), армування виконуємо конструктивно. При $A'_s > 0$ виконуємо корегування величини сумарної площа перерізу (A_a) поздовжніх горизонтальних елементів із арматурної сталі (A_{sd}) чи гарячекатаного прокату (A_{ad}) з урахуванням величин розрахункових опорів на розтяг існуючих арматурних стержнів (f_s) і поздовжнього конструктивного елементу додаткового армування в розтягувальній зоні (f_{sd}) балкового елементу конструкції перекриття, за залежністю (2.47):

$$A_a = f_s / f_{sd} \times (A_s \times (n + 0,1) + A'_s). \quad (2.47)$$

2.3.6 Перевірка міцності на згин в розрахунковому комплексному перерізі балкового елементу конструкції перекриття при дії в ньому позитивного згинального моменту (M_{cw}) (див. розрахункові схеми комплексного перерізу балкового конструктивного елементу на рис. 2.2, рис. 2.3 і рис. 2.5).

Перевірку міцності на згин в розрахунковому комплексному тавровому перерізі балкового елементу конструкції перекриття, що підсилюється одночасно в стисненій і розтягувальній зонах, виконуємо за залежністю (2.48) при дотриманні в ньому рівноваги відносно результуючої осі стиснутої бетонної зони при зовнішній дії позитивного згинального моменту (M_{cw}):

$$M \leq f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_a \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f'_{sc} A'_{sc} \times (0,5x - a'_{sc}), \quad (2.48)$$

Виконуємо перевірку необхідної висоти (товщини) (d) додаткового залізобетонного шару набетонування для підсилення на рівні верхньої площини балкового елемента перекриття за співвідношенням (2.49) при дотриманні умови міцності на згин в його розрахунковому комплексному тавровому перерізі:

$$d = \frac{M \pm f_{sd} A_a \cdot a_0}{f_s A_s + f_{sd} A_a} - h_0 - \frac{f_s A_s + f_{sd} A_a}{2 f_{c1} b}. \quad (2.49)$$

Отримане значення висоти додаткового шару (d) порівнюємо з товщиною шару, яка була попередньо визначена в п.2.3.3 за співвідношенням (2.34), приймаємо для проектування конструкції підсилення перекриття більшу із величин висоти ($d_{\max}$) додаткового шару набетонування.

2.3.7 Перевірка міцності на згин в розрахунковому комплексному перерізі балкового елемента конструкції перекриття при дії в ньому від'ємного згинального моменту (M_{acw}) (див. розрахункові схеми на рис. 2.2 та рис. 2.8).

Перевірку міцності на згин у розрахунковому комплексному перерізі балкового елемента конструкції перекриття під дією від'ємного згинального моменту M_{acw} виконуємо за залежністю (2.50) при відсутності у його стиснутій зоні додаткової площі армування (A_a) від додаткового горизонтального конструктивного елемента (дивись розрахункову схему на рис. 2.8,а):

$$M_{acw} \leq f_s' A_s' \times (h_{sb} - 0,5x_c - a_s') + f_{sc}' A_{sc}' \times (h_{sb} + d - a_{sd} - 0,5x_c) + f_a' A_a' (h_{sb} - 0,5x_c) + f_s A_s \times (0,5x_c - a_s), \quad (2.50)$$

де x_c – висота зони стиснення бетону в розрахунковому комплексному поперечному перерізі, що визначається за співвідношенням (2.51):

$$x_c = (f_s' A_s' + f_{sc}' A_{sc}' + f_a' A_a') / (f_c \times b_w), \quad (2.51)$$

де A_a' – площа поперечного перерізу додаткових конструктивних елементів із арматурної сталі (A_{sd}') чи гарячекатаного прокату (A_{ad}'), якими здійснюється додаткове армування на рівні верхньої поверхні існуючого перерізу залізобетонного балкового елемента конструкції перекриття, які встановлюються в додатковому залізобетонному шарі набетонування комплексного перерізу балкового елемента перекриття, в якому діє зовнішній момент з від'ємний знаком (M_{acw});

f_a' – розрахункова міцність на розтяг додаткового конструктивного елемента із арматурної сталі (A_{sd}') чи гарячекатаного прокату (A_{ad}') на рівні верхньої поверхні плити існуючого монолітного залізобетонного перекриття, якими здійснюється додаткове армування на рівні верхньої поверхні

існуючого перерізу залізобетонного балкового елемента конструкції перекриття, які встановлюються в додатковому залізобетонному шарі набетонування комплексного перерізу балкового елемента перекриття, в якому діє зовнішній момент з від'ємний знаком (M_{acw}).

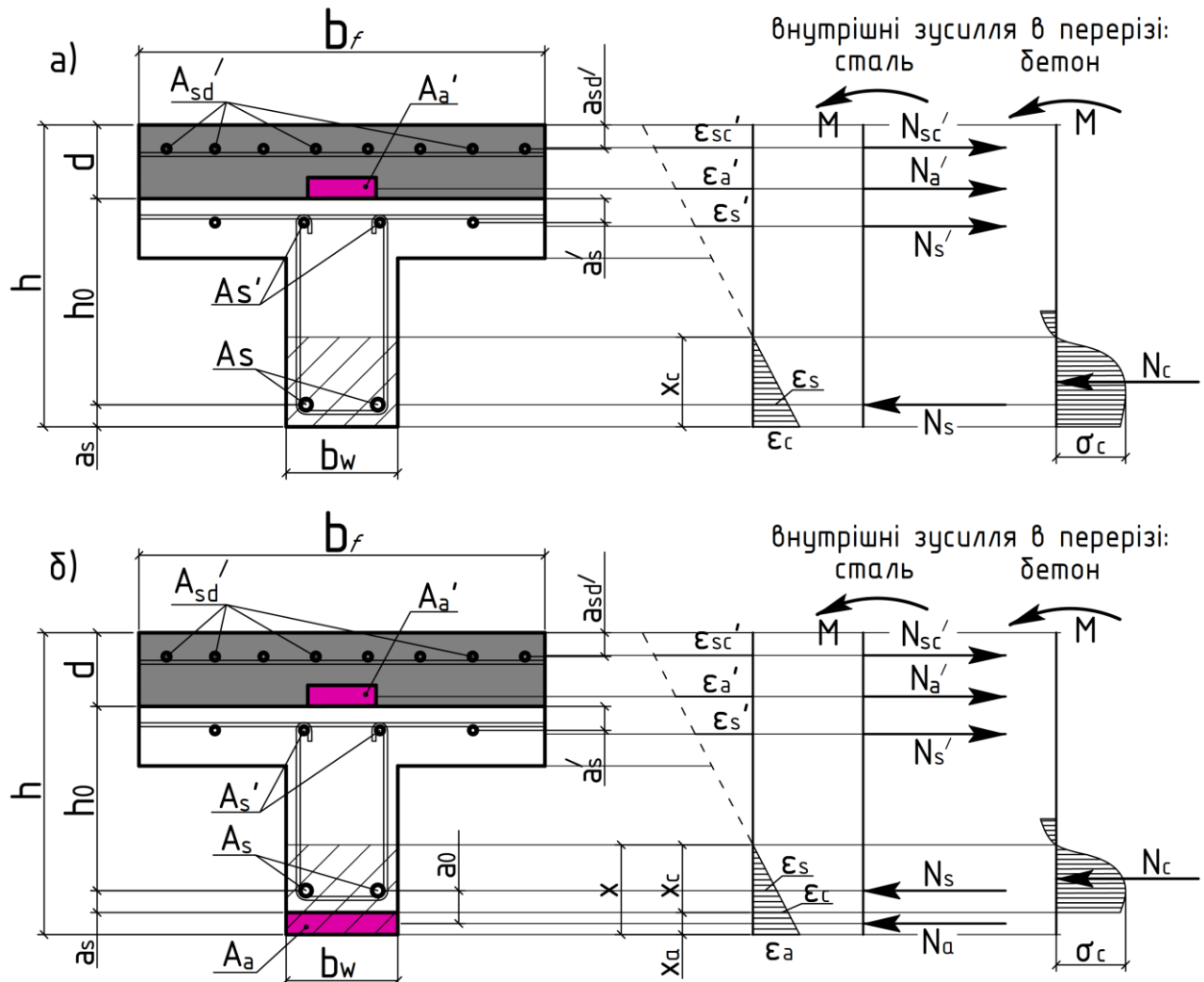


Рис. 2.8 Випадки напружено-деформованого стану в комплексному тавровому перерізі залізобетонного балкового елемента конструкції перекриття, що підсилюється шляхом збільшення поперечного перерізу додатковим шаром залізобетону в стиснутій зоні та армуванням у розтягнутій зоні, при дії в ньому величини від'ємного моменту (M_{acw}): а) комплексний перерізу балкового елемента без додаткового армування в нижній його зоні; б) комплексний перерізу балкового елемента з додатковим армуванням (A_a) в нижній його зоні

Перевірку міцності на згин у розрахунковому комплексному перерізі балкового елемента конструкції перекриття під дією від'ємного згинального

моменту M_{acw} виконуємо за залежністю (2.52) при наявності в його стиснутій зоні додаткової площі армування (A_a) від додаткового горизонтального конструктивного елементу (дивись розрахункову схему на рис. 2.8,б):

$$M_{acw} \leq f'_s A'_s \times (h_{sb} - 0,5x_c - a'_s) + f'_{sc} A'_{sc} \times (h_{sb} + d - a_{sd} - 0,5x_c) + f'_a A'_a (h_{sb} - 0,5x_c) + f_s A_s \times (0,5x_c - a_s) + f_a A_a \times 0,5x_c, \quad (2.52)$$

У разі недостатньої згинальної несучої здатності в розрахунковому комплексному перерізі балкового елемента при дії в ньому від'ємного згинального моменту M_{acw} необхідно виконати улаштування в ньому додаткового армування шляхом збільшення додаткової площі армування (A'_a) з елементів із гарячекатаного прокату або шляхом збільшення площі армування (A'_{sc}) додаткового шару набетонування товщиною (d) (дивись розрахункові схеми на рис. 2.8).

2.3.8 Визначення зусилля зсуву (V_{hv}), яке виникає вздовж площини стикування додаткового залізобетонного шару надбетонування товщиною d з верхньою площиною існуючого збірного залізобетонного елемента конструкції перекриття залежно від випадку напружено-деформованого стану (НДС) в його розрахунковому комплексному перерізі при згині.

Величину сумарного зусилля зсуву (V_{hv}) між бетонними компонентами у двохшарових залізобетонних балкових чи плитних елементах конструкції перекриттів визначаємо залежно від випадку граничного напружено-деформованого стану (НДС) в їх розрахунковому комплексному перерізі при згині (див. рис. 2.2 і рис. 2.9):

– випадок при від'ємному моменті M_{acw} в перерізі 1-1 (дивись конструктивну схему на рис. 2.2 та розрахункову схему на рис. 2.9,а):

$$V_{hv} = C = f_a A_a + f_s A_s + f_c b_w x_c - \sigma'_s A'_s; \quad (2.53)$$

$$V_{hv} = T = f_a A'_a + f'_{sc} A'_{sc}, \quad (2.54)$$

де $\sigma'_s = \varepsilon'_s E_s$; $\varepsilon'_s = \varepsilon_c x_c / (h_0 + a_s - a'_s - x_c)$;

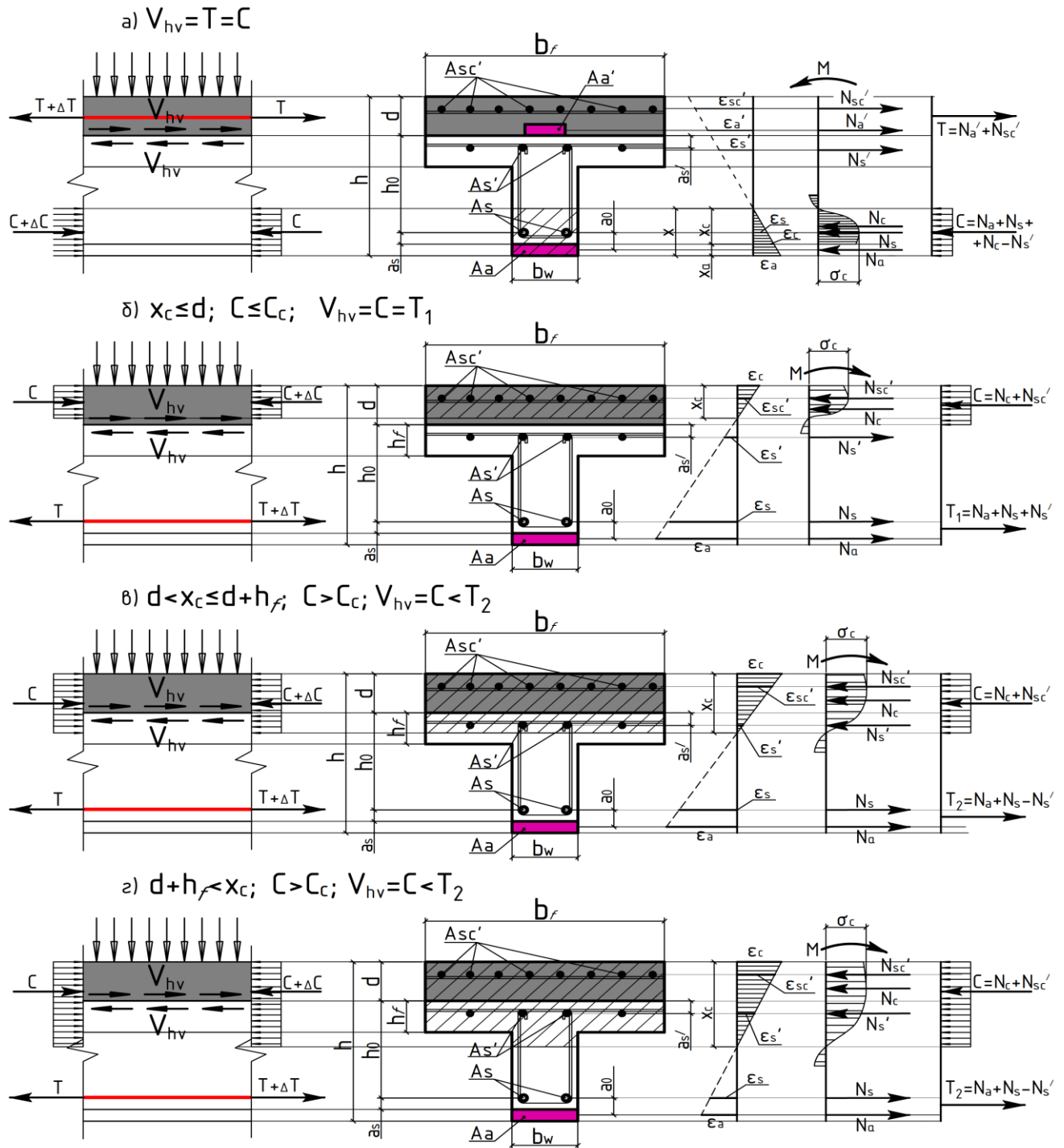


Рис. 2.9 Горизонтальна зсувна сила (V_{hv}) на межі розділу між верхнім додатковим залізобетонним шаром набетонування та верхньою площиною існуючого поперечного перерізу балкового елемента конструкції перекриття, що підсилюється, залежно від: а) НДС у перерізі 1-1 з від'ємним моментом (M_{acw}); б), в), г) НДС у перерізах 2-2 у прогоні балкового залізобетонного елемента (див. рис. 2.2), в якому діє позитивний момент (M_{cw}), відповідно від виду і висоти стиснутої зони бетону (x_c)

- випадок при позитивному моменті M_{cw} в перерізі 2-2 при $x_c \leq d$ (дивись конструктивну схему на рис. 2.2 та розрахункову схему на рис. 2.9,б):

$$V_{hv} = C = f_{c1} b_f x_c + f'_{sc} A'_{sc}; \quad (2.55)$$

$$V_{hv} = T = f_a A_a + f_s A_s + \sigma'_s A'_s, \quad (2.56)$$

де $\sigma'_s = \varepsilon'_s E_s$; $\varepsilon'_s = \varepsilon_c x_c / (d + a'_s - x_c)$.

- випадок при позитивному моменті M_{cw} в перерізі 2-2 при $d < x_c \leq d + h_f$ (дивись конструктивну схему на рис. 2.2 та розрахункову схему на рис. 2.9,в):

при $x_c \leq d + a'_s$:

$$V_{hv} = C = b_f [f_{c1} d + f_c (x_c - d)] + f'_{sc} A'_{sc} < f_a A_a + f_s A_s + \sigma'_s A'_s, \quad (2.57)$$

при $x_c > d + a'_s$:

$$V_{hv} = C = b_f [f_{c1} d + f_c (x_c - d)] + f'_{sc} A'_{sc} < f_a A_a + f_s A_s - \sigma'_s A'_s, \quad (2.58)$$

- випадок при позитивному моменті M_{cw} в перерізі 2-2 при $x_c > d + h_f$ (дивись конструктивну схему на рис. 2.2 та розрахункову схему на рис. 2,г):

при $x_c > d + a'_s$:

$$V_{hv} = C = f_{c1} b_f d + f_c [b_f (x_c - d) + b_w (x_c - d - h_f)] + f'_{sc} A'_{sc} < f_a A_a + f_s A_s - \sigma'_s A'_s. \quad (2.59)$$

Сумарне зусилля зсуву (V_{hv}), яке виникає на межі стикування різних бетонних компонентів у двошарових залізобетонних балкових елементах конструкції перекриттів, повинно бути менше міцності на зсув компонентів з'єднувальних елементів:

$$V_{hv} \leq P_{Rd}, \quad (2.60)$$

де P_{Rd} – несуча здатність на зсув різної конструктивної форми компонента з'єднувального елемента, яка визначається згідно норм [163].

Якщо умова міцності на зсув (2.60) задовольняється, то виконують конструювання і розміщення компонентів з'єднувальних елементів по довжині стикування між бетонними шарами двошарового залізобетонного балкового

елементу конструкції перекриття залежно від його НДС в розрахунковому комплексному перерізі при згині.

2.4 Методика розрахунку міцності на згин композитних залізобетонних балкових елементів методом розрахункового опору залізобетону, які утворюються при їх підсиленні.

2.4.1 Передумові розрахунку міцності на згин композитних залізобетонних балкових елементів методом розрахункового опору залізобетону

Розрахунок міцності на згин композитних залізобетонних балкових елементів, які утворюються при їх підсиленні, здійснюється на основі нелінійних моделей розрахунку з використанням дійсних діаграм деформування бетону та арматури. Наступні основні передумови розрахунку, які приймаються для реалізації запропонованої методики:

1) компоненти (конструктивні шари), із яких складаються комбіновані перерізи балкових елементів, працюють при згині спільно без зміщення один відносно іншого;

2) залежність повздовжніх деформацій бетону в перерізі комбінованих балкових елементів приймається лінійною;

3) залежність “напруження-деформації” у бетоні стиснутої зони в перерізах комбінованих залізобетонних балкових елементів, що працюють на згин, приймається нелінійною у вигляді функції, яка запропонована у нормах Єврокоду-2 [160];

4) залежність “напруження-деформації” в арматурі чи сталєвих елементах в перерізах комбінованих залізобетонних балкових елементів, що працюють на згин, приймається у вигляді дволінійної діаграми Прандтля;

5) зусиллям у розтягнутій зоні бетону, яке виникає в поперечних перерізах комбінованих балок, що працюють на згин, нехтуємо.

Розрахунок перерізів, що працюють на згин, в комбінованих залізобетонних балкових елементах здійснюємо на основі рівнянь рівноваги, які мають наступний вигляд (рис. 2.10):

$$\sum_{i=1}^n N_{ix} = 0; N_{c1} + N_{c2} + N_s = 0; \quad (2.61)$$

$$\sum_{i=1}^n M_i = M_u; M_{c1} + M_{c2} + M_s = M_u. \quad (2.62)$$

де у виразах (2.61), (2.62): N_s – зусилля в арматурі;

N_{c1} , N_{c2} – зусилля у частині стиснутого бетону комбінованої балки, виконаної відповідно з бетону класу C_1 та C_2 ;

M_{c1} , M_{c2} – згинальний момент відносно нейтральної лінії відповідних частин стиснутого бетону;

M_s – згинальний момент від зусилля в робочій арматурі відносно нейтральної лінії.

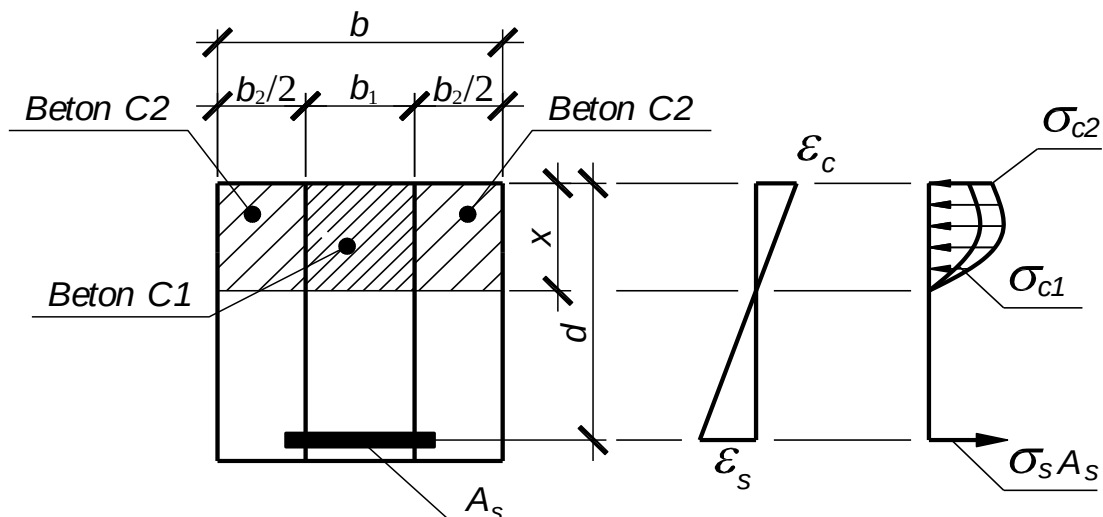


Рис. 2.10 Схема напружень та деформацій у розрахунковому перерізі, який працює на згин, в комбінованому залізобетонному балковому елементі, який утворюється в результаті підсилення залізобетонного балкового елемента шляхом нарощування перерізу з двох боків

Визначення зусиль у стиснутій зоні бетону розрахункового перерізу елемента пропонується здійснювати двома способами. У першому способі передбачається розбиття перерізу комбінованої балки на певну кількість ділянок, в межах яких приймаються напруження постійними. У такому випадку суттєвого значення не має вигляд прийнятої функції напружень у бетоні стиснутої зони. Для отримання необхідної точності розрахунку даний спосіб потребує розбиття перерізу на

значну кількість ділянок. Другий спосіб полягає у безпосередньому інтегруванні отриманих рівнянь. Для нього велике значення має функція напружень у стиснутому бетоні, так як при використанні складних формул у більшості випадків отримують трансцендентні рівняння, розв'язок яких призводить до великих ускладнень. У такому випадку доцільно використовувати поліноміальні залежності [161], які легко інтегруються.

Для отримання значення несучої здатності комбінованого залізобетонного балкового елемента необхідно до рівнянь (2.61) та (2.62) прийняти один із описаних вище способів отримання зусиль в стиснутій зоні бетону перерізу та застосувати критерії руйнування у вигляді (2.63):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM_d}{d\varepsilon} = 0, \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}; \\ \sigma_s \leq f_{yd}; \\ \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}. \end{array} \right. \quad (2.63)$$

Розрахунок міцності на згин композитних залізобетонних балкових елементів, які утворюються при їх підсиленні, незалежно від прийнятого способу визначення зусиль у стиснутій зоні бетону в розрахунковому перерізі, виконуємо методом ітерацій.

2.4.2 Основи розрахунку міцності на згин комбінованих залізобетонних балкових елементів, які утворюються в результаті їх підсилення шляхом двобічного симетричного нарощування перерізів, за допомогою методу розрахункових опорів залізобетону.

Методика розрахунку міцності на згин комбінованих залізобетонних балкових елементів, які утворюються в результаті їх підсилення шляхом двобічного симетричного нарощування перерізів, базується на властивостях методу розрахункових опорів залізобетону, в основу якого покладені передумови, що викладені в п. 2.4.1. Умови міцності на згин комбінованих залізобетонних балкових елементів з урахуванням критеріїв руйнування (2.63) приведені в основному рівнянні (2.64) рівноваги в їх розрахунковому перерізі:

$$M = f_z W_c, \quad (2.64)$$

де W_c – момент опору робочого перерізу бетону, м³;

f_z – розрахунковий опір залізобетону при згині, МПа, який визначаємо за формулою (2.65):

$$f_z = k_z f_{cd}. \quad (2.65)$$

Параметр k_z функціонально залежить від механічного процента армування (ω), який визначаємо за виразом (2.66):

$$\omega = \frac{\rho_f f_{yd}}{f_{cd}}, \quad (2.66)$$

де ρ_f – коефіцієнт армування перерізу поздовжньою арматурою;

f_{yd} – розрахунковий опір поздовжньої арматури;

f_{cd} – розрахунковий опір бетону на стиск.

Величини параметру k_z визначаємо за формулою (2.68) із функціональної залежності $k_z=f(\omega)$ згідно формули (2.67):

$$\omega = (k_z - \alpha) / \beta; \quad (2.67)$$

$$k_z = \alpha + \beta \omega. \quad (2.68)$$

Основні параметри функціональної залежності $k_z=f(\omega)$ та коефіцієнтів (α) і (β) її апроксимації приведені у таблиці 2.2.

Розглянемо поперечний переріз комбінованої балки прямокутного поперечного перерізу, яка утворюється після улаштування підсилення залізобетонної балки шляхом двобічного нарощування перерізу (дивись рис. 2.11).

Поперечний переріз комбінованої балки складається із трьох прямокутників – середній прямокутний переріз має міцність бетону на стиск f_{c1} та ширину b_1 , два крайніх перерізи f_{c2} та відповідні ширини $b_2/2$. У такому випадку сумарна ширина перерізу складає $b=b_1+b_2/2+b_2/2$.

Таблиця 2.2 Функціональна залежність $k_z=f(\omega)$ та параметри (α) і (β) її апроксимація в залежностях (2.67) і (2.68)

№ п/п	Параметри функціональна залежність $k_z=f(\omega)$ для розрахунку залізобетонних згинальних елементів			
	Параметр k_z	Механічний коефіцієнт армування ω	Апроксимаційні параметри	
			α	β
1	0,000	0,00	0,000	5,678
2	0,568	0,10		
3	0,828	0,15	0,048	5,196
4	1,071	0,20	0,096	4,874
5	1,299	0,25	0,161	4,553
6	1,511	0,30	0,241	4,231
7	1,706	0,35	0,338	3,910
8	1,885	0,40	0,450	3,588
9	2,028	0,45	0,744	2,852
10	2,070	0,50	1,649	0,841
11	2,140	0,60	1,722	0,696
12	2,195	0,70	1,808	0,554
13	2,310	1,00	1,928	0,382
14	2,476	2,00	2,143	0,166
15	2,542	3,00	2,345	0,065

Умовно розкладаємо поперечний переріз комбінованої балки у відповідності з рис. 2.11, таким чином, щоб міцність двох перерізів із різних класів бетону відповідала міцності комбінованого перерізу. Тобто при заданих геометричних параметрах двох балок із різних класів бетону необхідно між ними відповідно розподілити поздовжнє армування.

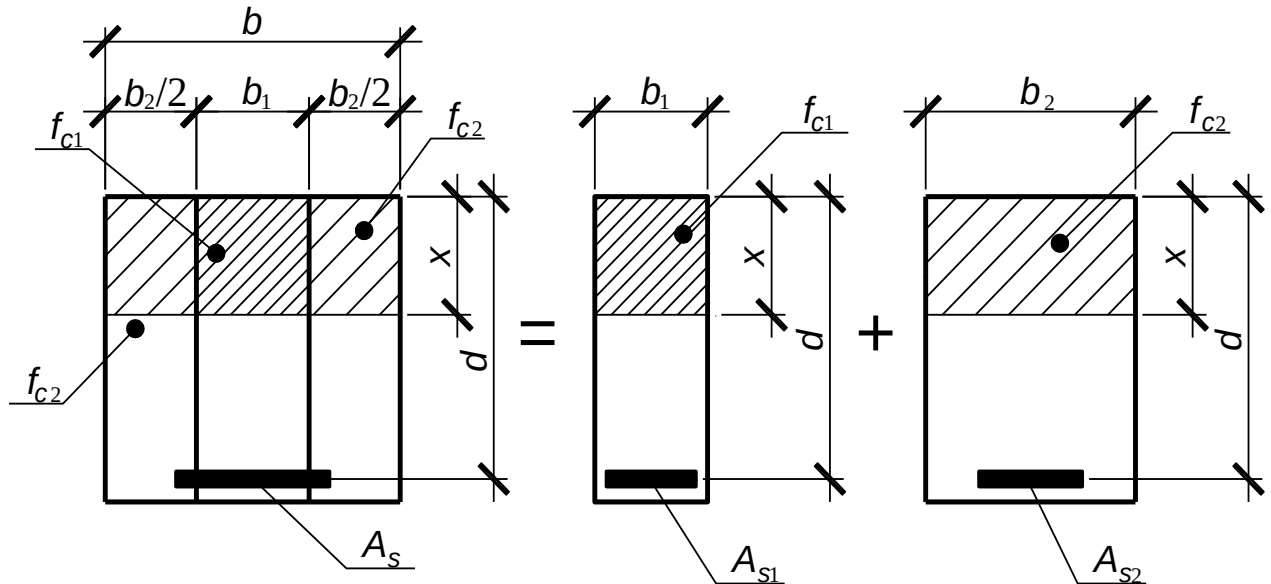


Рис. 2.11 Схема утворення поперечних перерізів комбінованої балки, які утворюються після улаштування підсилення залізобетонної балки прямокутного перерізу шляхом двобічного їх нарощування, для розрахунків за методом розрахункового опору залізобетону

У такому випадку міцність комбінованого перерізу за методом розрахункових опорів залізобетону буде дорівнювати:

$$M_u = M_{u1} + M_{u2}; M_u = f_{c1} k_{z1} \frac{b_1 d^2}{6} + f_{c2} k_{z2} \frac{b_2 d^2}{6}. \quad (2.69)$$

Як видно із виразу (2.69), розділити переріз комбінованої балки на два згідно схеми на рис. 2.11, можливо лише за умови рівності величин:

$$f_{c1} k_{z1} = f_{c2} k_{z2}. \quad (2.70)$$

Дійсно, якщо умова (2.70) справедлива, то міцність на згин перерізів комбінованої балки буде становити:

$$M_u = f_{c1} k_{z1} \frac{d^2}{6} (b_1 + b_2) = f_{c1} k_{z1} \frac{b d^2}{6}. \quad (2.71)$$

В такому випадку задача розрахунку міцності на згин комбінованої балки зводиться до пошуку відповідного розподілення арматури між сумарними перерізами звичайних балок відповідно шириною b_1 і b_2 (дивись рис. 2.11).

Умову (2.70) перетворюємо у рівність (2.72) з урахуванням виразу (2.68)

$$f_{c1}(\alpha_1 + \beta_1 \omega_1) = f_{c2}(\alpha_2 + \beta_2 \omega_2). \quad (2.72)$$

В розширеному вигляді вираз (2.72) набуде вигляду:

$$f_{c1} \left(\alpha_1 + \beta_1 \frac{A_{s1} f_{yd}}{b_1 d} \right) = f_{c2} \left(\alpha_2 + \beta_2 \frac{A_{s2} f_{yd}}{b_2 d} \right). \quad (2.73)$$

Необхідна площа армування (A_{s2}) в нижній розтягувальній зоні додаткових бокових бетонних шарів набетонування перерізу залізобетонної балки, що підсилюється, визначається за залежністю (2.74):

$$A_s = A_{s1} + A_{s2}; \quad A_{s2} = A_s - A_{s1}, \quad (2.74)$$

де A_s – сумарна площа армування в розтягувальній зоні перерізу комбінованої балки, що утворюється в результаті її підсилення шляхом двобічного набетонування на всю її висоту;

A_{s1} – площа перерізу армування в розтягувальній зоні існуючої залізобетонної балки, що підсилюється.

Після нескладних перетворень виразу (2.73) з урахуванням залежності (2.74) отримаємо формулу (2.75) для визначення необхідної площі армування (A_{s2}) в нижній розтягувальній зоні додаткових бокових бетонних шарів набетонування перерізу існуючої залізобетонної балки, що підсилюється шляхом нарощування перерізів:

$$A_{s2} = \frac{\left[\frac{f_{c1}}{f_{c2}} \left(\alpha_1 + \frac{\beta_1 f_{yd} A_{s1}}{b_1 d} \right) - \alpha_2 \right] b_2 d}{\beta_2 f_{yd}}. \quad (2.75)$$

Для зручності користування виразом (2.75) введемо величини розрахункового опору залізобетону існуючої залізобетонної балки (f_1) і коефіцієнту відношення величин міцності бетону існуючої балки до міцності бетону додаткових шарів набетонування (Δ_f):

$$f_1 = \frac{A_{s1} f_{yd}}{b_1 d}, \quad \Delta_f = \frac{f_{c1}}{f_{c2}}. \quad (2.76)$$

Після перетворень залежність (2.75) для визначення необхідної площі армування (A_{s2}) в розтягувальній зоні додаткових шарів набетонування, за допомогою яких здійснюється підсилення перерізу існуючої залізобетонної балки, матиме наступний вигляд:

$$A_{s2} = \frac{[\Delta_f (\alpha_1 + \beta_1 f_1) - \alpha_2] b_2 d}{\beta_2 f_{yd}}. \quad (2.77)$$

2.4.3 Застосування аналітичних залежностей запропонованої методики при рішенні задач з розрахунку міцності на згин комбінованих балок, які утворюються в результаті підсилення перерізів по всій висоті існуючої залізобетонної балки додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням.

Представлені вище вирази дозволяють виконувати рішення двох типів задач розрахунку міцності на згин комбінованих балок, які утворюються в результаті підсилення перерізів по всій висоті існуючої залізобетонної балки додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням:

- задача типу 1: визначення необхідної площі армування в нижній розтягувальній зоні додаткових бокових бетонних шарів набетонування перерізу в комбінованій балці, яка утворюється в результаті підсилення перерізів існуючої залізобетонної балки шляхом їх нарощуванням по всій висоті додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням;
- задача типу 2: визначення міцності на згин комбінованої балки, яка утворюється в результаті підсилення перерізів по всій висоті існуючої залізобетонної балки додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням.

Нижче в розділі 4 роботи представлено приклади розрахунку міцності на згин комбінованих балок, які утворюються в результаті підсилення перерізів по всій

висоті існуючої залізобетонної балки додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням, рішення яких здійснюється за допомогою запропонованої методики.

2.5 Висновки за другим розділом по теоретичним розробкам.

2.5.1 Запропонований в п. 2.2 метод дає можливість розраховувати залежно від передумов навантаження міцність на згин перерізів залізобетонних елементів, які підсилені шляхом встановлення в розтягненій зоні додаткової арматури, яка закріплюється до основної (існуючої) за допомогою переривистих зварних швів. Методика розрахунку міцності на згин залізобетонних балок, які армовані додатковою поздовжньою арматурою під час навантаження, дозволяє визначити: площу раціонального (оптимального) поздовжнього армування їх перерізів; місце (положення) оптимального зварювання арматурних стрижнів, які використовуються для посилення перерізів балок у розтягнутій зоні.

2.5.2 Запропонований в п. 2.3 метод послідовного розрахунку міцності на згин комплексних Т-подібних перерізів балкових і плитних елементів залізобетонних перекриттів, які підсилені шляхом улаштування в них додаткового залізобетонного шару набетонування в зоні стиску та додаткового армування в зоні розтягу, а саме: монолітного залізобетонного перекриття; перекриттів із збірних залізобетонних ребристих плит чи плоских плит з круглими пустотами. Метод розрахунку забезпечує необхідну міцність у розрахункових комплексних перерізах балково-плитних елементів конструкцій перекриттів, як при згинанні, так і при зсуві, а також дозволяє ефективно розраховувати раціональні перерізи конструктивних компонентів підсилення балкових елементів перекриттів, враховуючи наявне в них армування.

2.5.3 Запропонована в п.2.4 методика розрахунку міцності на згин комбінованих залізобетонних балкових елементів, які утворюються в результаті їх підсилення шляхом двобічного симетричного нарощування їх перерізів. Дана методика базується на методі розрахункового опору залізобетону, який ґрунтується на універсальній функціональній залежності $k_z = f(\omega)$ міцносних

характеристик залізобетонного конструктивного елементу, що згинається. За допомогою представлених в п.2.4 аналітичних залежностей маємо можливість виконати рішення двох типів задач: задачі типу 1: визначення необхідної площі армування в нижній розтягувальній зоні додаткових бокових бетонних шарів набетонування перерізу в комбінованій балці, яка утворюється в результаті підсилення перерізів існуючої залізобетонної балки шляхом їх нарощуванням по всій висоті додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням; задачі типу 2: визначення міцності на згин комбінованої балки, яка утворюється в результаті підсилення перерізів по всій висоті існуючої залізобетонної балки додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням.

2.5.4 Впровадження в проектну практику запропонованих в розділі 2 загальної класифікації варіантів способів підсилення (відновлення) балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів та методик розрахунку їх міцності на згин дозволить ефективно вирішувати проблеми, пов'язані з посиленням залізобетонних балкових конструктивних елементів перекриттів (покриття) під час ремонту та реконструкції будівель та споруд.

РОЗДІЛ 3

МІЦНІСТЬ ТА РОЗПОДІЛ ЗУСИЛЬ ЗВАРЕНИХ ВНАКЛАДКУ СКЛАДЕНИХ ПОЗДОВЖНІХ АРМАТУРНИХ СТЕРЖНІВ, ЯКІ УТВОРЮЮТЬСЯ ПРИ ПІДСИЛЕННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ШЛЯХОМ НАРОЩУВАННЯ ПЕРЕРІЗУ В РОЗТЯГНЕНІЙ ЗОНІ

3.1 Задачі і методика проведення експериментальних досліджень.

Метою експериментальних досліджень зварених внакладку окремих поздовжніх арматурних стержнів складеного перерізу з різними конструктивними рішеннями, які утворюються при підсиленні залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу в розтягненій зоні, є визначення їх міцності на розтяг, деформативності та характеру розподілу зусиль по їх довжині при дії зусилля, яке моделює стадію позацентрового розтягу робочої арматури в нижній зоні перерізів балкових елементів при згині чи при застосуванні в них попереднього напруження.

Проведення експериментальних дослідження обумовлені необхідністю визначення впливу різних факторів, які зазначені нижче за текстом, на міцність позацентрово розтягнутих зварених внакладку арматурних стрижнів складеного перерізу у порівнянні з міцністю центрально-розтягнутих еталонних арматурних стрижнів відповідно для одного із найбільш поширеного класу A400C (A-III) арматурної сталі.

Основні фактори, які впливають на характеристики міцності на розтяг та надійність зварних з'єднань стержнів із арматурних сталей, які зварені внакладку, а саме:

- на механічні властивості зварних з'єднань стрижневої гарячекатанної арматури впливає термічний контактний електронагрів, рівень впливу якого безпосередньо залежить від методу та режиму зварювання, товщини зварюваного металу, форми зварювання. У зоні термічного впливу можна розрізнити ділянки, в яких спостерігається нерівномірне розподілення температур нагріву, від яких

відбуваються різні зміни структури металу залежно від їх величини, а саме: старіння при $T=200-300^{\circ}\text{C}$; відпуск – при $T=250-650^{\circ}\text{C}$; неповна перекристалізація - близько $T=700-800^{\circ}\text{C}$; нормалізація – $T=840-1000^{\circ}\text{C}$; перегрівання - при $T=1000-1250^{\circ}\text{C}$, а на ділянці безпосередньо поблизу зварного шва при температурі $T>1250^{\circ}\text{C}$ – відбувається плавлення сталі. У період нагрівання сталі в інтервалі температур $T=700-900^{\circ}\text{C}$ відбувається перетворення у структурі сталі фериту та терміту на аустеніт. При температурі $T=900-1000^{\circ}\text{C}$ починається інтенсивне зростання зерна аустеніту, середній діаметр якого на ділянці поблизу шва становить: при ручному дуговому зварюванні – $\delta=0,1-0,15$ мм; при однопрохідному зварюванні під флюсом сталей товщиною $t=15-20$ мм – $\delta=0,2-0,3$ мм; при електрошлаковому зварюванні сталей великих товщин $t=100-200$ мм – $\delta=0,4-0,8$ мм. На ділянках у зоні температур близьких до $T=900^{\circ}\text{C}$ і менше розмір зерна аустеніту зменшується до мінімального. На ділянці температур від $T=1250^{\circ}\text{C}$ і вище різко змінюється структура металу і знижується якість зварного з'єднання. В результаті температурних впливів в з'єднаннях стержнів із арматурних сталей залежно від величини температурного нагріву можуть знижуватися умовна межа плинності (σ_T ($\sigma_{0,2}$)), тимчасовий опір (σ_B) та відносне подовження після розірвання (δ_5), а також початковий модуль пружності (E_s), що призводить до зменшення їх пластичності та крихкості. Так для гарячекатаної арматурної сталі класів A240 С (A-I), A400 С (A-III) та A500 С спостерігається монотонне зниження межі плинності при нагрівання до $T=100^{\circ}\text{C}$ і вище: при нагріванні до $T=400^{\circ}\text{C}$ зниження може становити до 50% від вихідного значення, а при нагріванні до $T=500^{\circ}\text{C}$ – до 65%;

- на опір утворенню гарячих і холодних тріщин у елементах зварного з'єднання впливають їх хімічний склад та умови кристалізації металу зварного шва, які залежать від: типу електродів, флюсів, захисних газів; типу зварного монтажного з'єднання; параметрів режиму при зварюванні; товщини зварюваних елементів; жорсткості зварювальних з'єднань і температурних умов зварювання. Вплив

хімічного складу на зварюваність основного металу арматурних стрижнів обумовлюється їх вуглецевим еквівалентом (CE). Сталі з вмістом $CE=0,2...0,35\%$ добре зварюються. При вуглецевому еквіваленті $CE=0,45-0,5\%$ і більше в сталях у навколошовних зонах можуть виникнути холодні і гарячі мікротріщини, що потребує додаткових заходів для початкового підігрівання елементів вузлів з'єднання при зварюванні;

- на характеристики міцності зварних з'єднань із арматурних сталей також впливає конструктивне рішення вузла їх сполучення, від якого залежить поява ефекту концентрації напружень, здатне знижувати тимчасову і втомну міцність арматурних стержнів поблизу з'єднання. При цьому в окремих перерізах арматурних стержнів поблизу вузла сполучення при позацентровому розтязі, крім поздовжнього зусилля N_s , додатково діє згинальний момент M_s , що призводить до появи в них ранньої пружно-пластичної стадії при виникненні напружень, які перевищують границю текучості σ_T .

Вплив вище зазначених факторів необхідно врахувати при розрахунку конструктивних елементів з підсилення залізобетонних балок, так як вони безпосередньо впливають на їх напружено-деформований стан та несучу здатність при згині в момент руйнування.

Для вивчення впливу на міцність при розтязі фактору концентрації напруги та зони зниження міцності металу у перерізі довшого арматурного стрижня біля місця обриву короткого, де здійснювалось їх з'єднання за допомогою електродугового зварювання при підсиленні залізобетонних балок шляхом збільшення площі перерізу їх поздовжнього армування в розтягувальній зоні, були розроблені та випробувані 16-ть арматурних стрижнів-зразків складеного перерізу з різними конструктивними рішеннями за серіями I-VI (див. рис. 3.1 та таблиці 3.1-3.5). Експериментальні арматурні стержні-зразки склалися з більш довшого арматурного стрижня, до якого симетрично щодо його середини певним чином за допомогою переривчастих зварних швів або епоксидного двокомпонентного клею кріпився короткий арматурний стрижень.

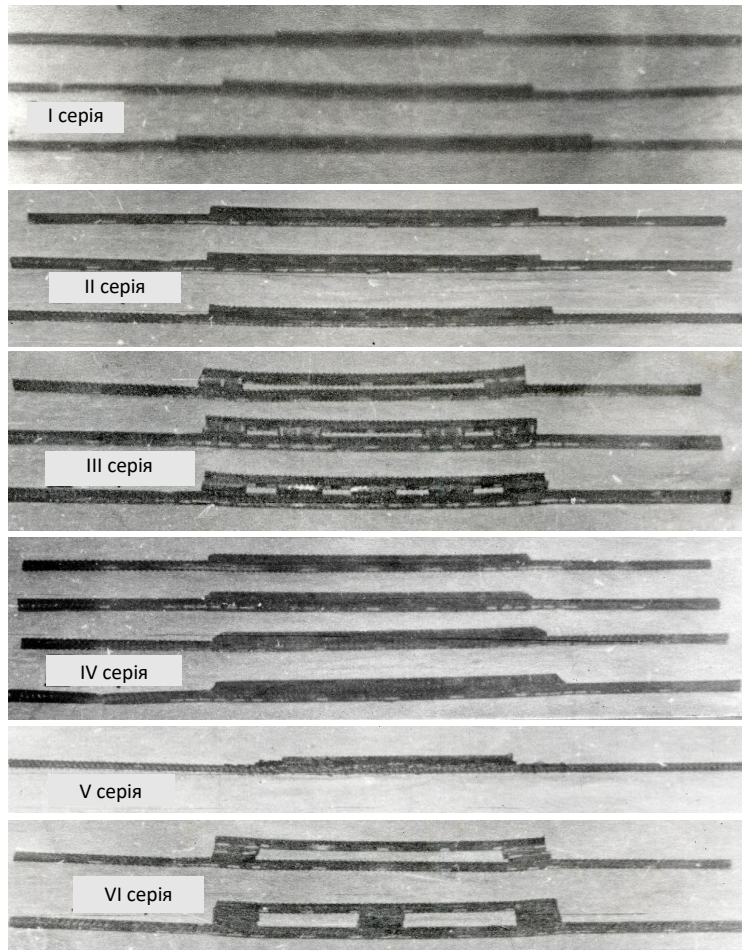


Рис 3.1 – Загальний вигляд арматурних стержнів-зразків складеного перерізу за серіями I-VI, що були випробувані

Довжина довшого арматурного стержня в зразках I-ї серії складала $L=1,5$ м, а в серіях II-VI - $L=1,0$ м. Довжина короткого арматурного стержня в зразках серій складала $l=0,3 \dots 0,65 \times L$ від довшого. Складові елементи стержнів-зразків були виготовлені із арматурної сталі класу А-III (A400C), діаметром $d=16$ мм. Зварювання стрижнів в зразках серій I-IV, VI було виконане за допомогою електродів типу Е-50-А марки УОНІ, діаметром $d_e=3$ мм. Довжина двосторонніх переривчастих зварних швів на ділянках з'єднання стрижнів приймалася рівною чотирьом діаметрам меншого з арматурних стрижнів, що з'єднувалися.

Наплавлення металу в крайніх зварних швах здійснювалося у напрямку від місця обриву короткого стрижня до кінця його довжини, при цьому початок улаштування шва був виконаний з відступом 2-5 мм від місця його обриву. У зразку V-ї серії з'єднання арматурних стрижнів між собою по всій довжині було здійснене за допомогою двокомпонентної суміші на основі епоксидного клею, що дало можливість дослідити розподіл напружень між елементами в пружній стадії (до появи руйнування з'єднувального шва за рахунок дії дотичних зусиль).

У кожній серії вивчався певний фактор, здатний впливати на концентрацію напружень у перерізах довшого стрижня біля місця обриву короткого, а також на їхню

міцність та жорсткість у порівнянні з окремими арматурними стрижнями одного й того ж діаметра, що випробовувалися на центральне розтягування.

У І-й серії зразків варіювалася відносна довжина короткого арматурного стрижня, що становила величину: $l=0,35 \times L$; $l=0,5 \times L$ та $l=0,65 \times L$ від довшого арматурного стрижня (дивись таблицю 3.1). З'єднання короткого стрижня з довгим здійснювалося зварними швами тільки з обох боків на крайніх ділянках короткого.

Таблиця 3.1 – Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією І

Номер серії та зразка		Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією І. Місця розташування тензодатчиків типу ПКБ-5-100 в перерізах по довжині стержнів-зразків	
		Поперечні перерізи	Ескіз конструктивного рішення арматурного стержня-зразка
І	1		reinforcing bar-sample 1 series I
	2	1-1 short reinforcing bar Ø16, A400C (A-III) 2-2 long reinforcing bar Ø16, A400C (A-III)	reinforcing bar-sample 2 series I
	3		reinforcing bar-sample 3 series I

У II-й, III-й та IV-й серіях варіювався ексцентриситет між геометричними осями довгого та короткого арматурних стрижнів та число (від 2-х до 5-и) переривчастих зварних швів - ділянок з'єднання стрижнів по довжині, конструктивні рішення яких приведені відповідно в таблицях 3.2-3.4.

Таблиця 3.2 – Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією II

Номер серії та зразка		Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією II. Місця розташування тензодатчиків типу ПКБ-5-100 в перерізах по довжині стержнів-зразків	
		Поперечні перерізи	Ескіз конструктивного рішення арматурного стержня-зразка
II	4		reinforcing bar-sample 4 series II
	5	1-1 short reinforcing bar Ø16, A400C (A-III) 2-2 long reinforcing bar Ø16, A400C (A-III)	reinforcing bar-sample 5 series II
	6		reinforcing bar-sample 6 series II

В зразках III-ї серії короткі стрижні з'єднувалися з довгими за допомогою додаткових арматурних відрізків (коротунів) діаметром $d=16$ мм довжиною $l_k=65$ мм, кількість яких змінювалася від 2-х до 5-и по довжині короткого елемента (дивись таблицю 3.3).

Таблиця 3.3 – Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією III

Номер серії та зразка	Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією III. Місця розташування тензодатчиків типу ПКБ-5-100 в перерізах по довжині стержнів-зразків	
	Поперечні перерізи	Ескіз конструктивного рішення арматурного стержня-зразка
III	7	reinforcing bar-sample 7 series III
	8	reinforcing bar-sample 8 series III
	9	reinforcing bar-sample 9 series III

Таблиця 3.4 – Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією IV

Номер серії та зразка		Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією IV. Місця розташування тензодатчиків типу ПКБ-5-100 в перерізах по довжині стержнів-зразків
		Поперечні перерізи
		Ескіз конструктивного рішення арматурного стержня-зразка
IV	10	reinforcing bar-sample 10 series IV
	11	reinforcing bar-sample 11 series IV
	12	reinforcing bar-sample 12 series IV
	13	reinforcing bar-sample 13 series IV

У IV-й серії стержнів-зразків змінювався перехід перерізів біля місця обриву короткого арматурного стрижня шляхом обрізання його торцевої ділянки під кутом $\alpha=60^\circ$, 45° і 30° до поздовжньої осі довшого стрижня та улаштування поблизу його торцевих ділянок поступового зварного переходу за рахунок наплавлення металу (дивись таблицю 3.4).

З'єднання арматурних стрижнів за допомогою епоксидного клею (смоли) в зразку V-ї серії дозволило наклеїти тензодатчики на обидва контактні крайні волокна і ретельніше вивчити напружено-деформований стан короткого і довшого стрижнів при їх позацентровому розтягуванні, чого неможливо було досягти на ділянках з'єднання зразків серій I-IV та VI за допомогою зварювання при температурі $t=600\ldots1200^\circ\text{C}$, яка призводить до руйнування тензорезисторів (дивись таблицю 3.5).

Таблиця 3.5 – Конструктивні рішення та розміри арматурного стержня-зразка за серією V

Номер серії та зразка	Конструктивні рішення та розміри арматурного стержня-зразка за серією V. Місця розташування тензодатчиків типу ПКБ-5-100 в перерізах по довжині стержнів-зразків	
	Поперечні перерізи	Ескіз конструктивного рішення арматурного стержня-зразка
V 14	1-1 short reinforcing bar $\phi 16$, A400C (A-III) two-component mixture based on epoxy glue long reinforcing bar $\phi 16$, A400C (A-III) 2-2 long reinforcing bar $\phi 16$, A400C (A-III)	reinforcing bar-sample 14 series V

Зразки VI-ї серії відрізнялися від зразків за серією III висотою вставок (коротунами) між арматурними стрижнями, які були виготовлені із двох однакових арматурних відрізків діаметром $d=16$ мм, довжиною $l_k=65$ мм, що були зварені по довжині між собою. Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією VI приведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією VI

Номер серії та зразка	Конструктивні рішення та розміри арматурних стержнів-зразків за серією VI. Місця розташування тензодатчиків типу ПКБ-5-100 в перерізах по довжині стержнів-зразків	
	Поперечні перерізи	Ескіз конструктивного рішення арматурного стержня-зразка
VI	15	reinforcing bar-sample 15 series VI
	16	reinforcing bar-sample 16 series VI

Випробування експериментальних арматурних стержнів-зразків складеного перерізу на позacentрове розтягування були проведені (див. рис. 3.2 і рис. 3.3) на універсальній розривній гідравлічній машині (УИМ-50) з максимальним зусиллям $N=50$ тс (500 кН). Зусилля розтягу (навантаження) прикладалося до зразка в машині УИМ-50 з кроком рівним $g=1$ т (10 кН). В серіях I, II, IV, V поздовжнє зусилля розтягу (N , кН) прикладалося до перерізу на середині арматурних стержнів-зразків з ексцентриситетом $e=16$ см, в серії III - з ексцентриситетом $e=32$ см, а серії VI - з ексцентриситетом $e=48$ см.

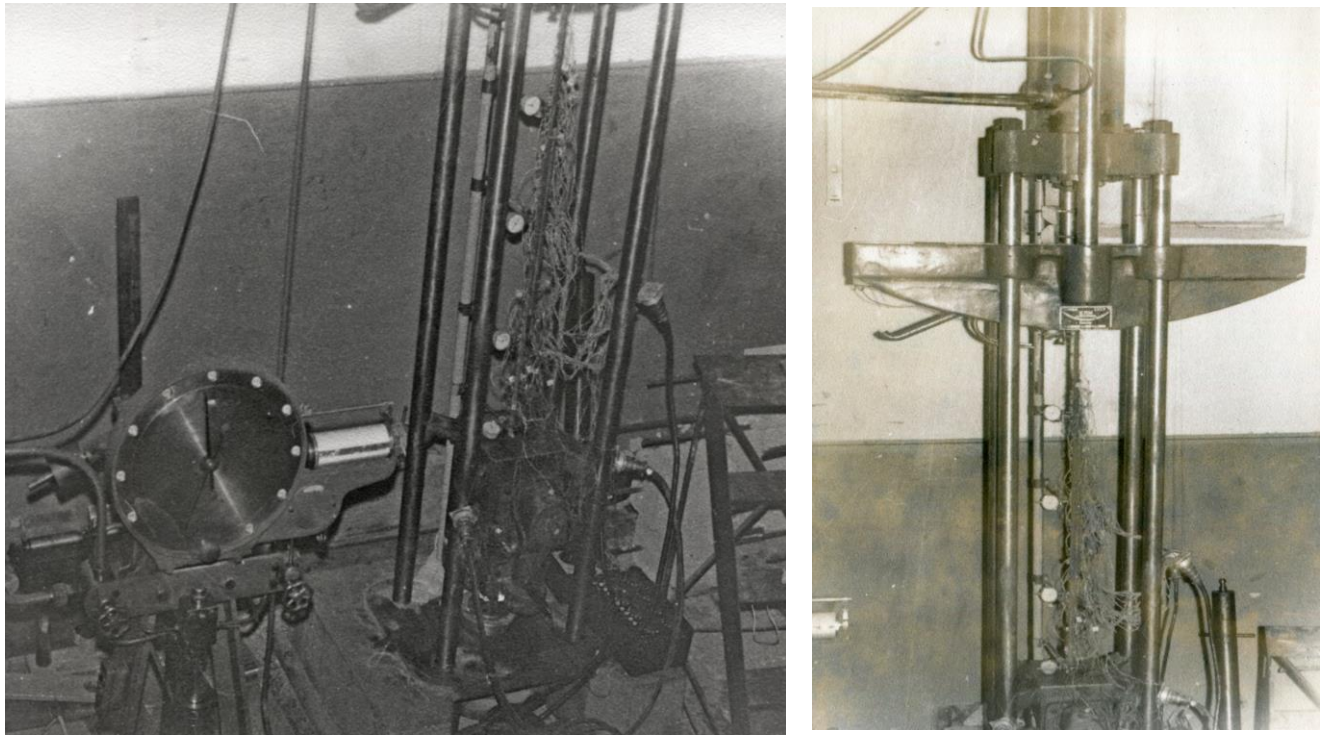


Рис. 3.2 - Випробування арматурного зразка довжиною $l=1,5$ м на розтяг в універсальній випробувальній машині УИМ-50

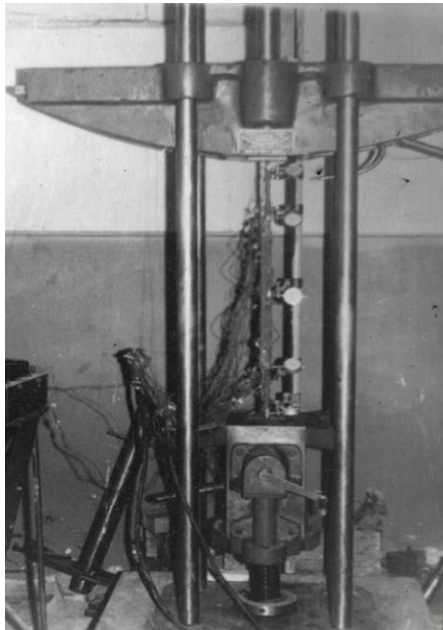


Рис. 3.3 - Випробування арматурного зразка довжиною $l=0,8$ м на розтяг в універсальній випробувальній машині УИМ-50

Розрахункова довжина арматурних стрижнів-зразків у зв'язку із затисканням їх кінців у захватах преса складала $L_p=1,3$ м (для зразків I-ї серії) та $L_p=0,8$ м (для зразків II-VI серій) (дивись рис. 3.4).

Під час випробувань арматурних стрижнів-зразків за допомогою приладів машини УИМ-50 здійснювалася автоматично побудова діаграми "розтягувальне зусилля N_s - відносне загальне подовження зразка Δl " (подовжнє зусилля N_s було прикладене до кінців довшого арматурного стрижня зразків). Отримані результати випробувань стрижнів-зразків складеного перерізу порівнювали з величиною міцності на розтяг та деформативними характеристиками окремих еталонних центрально-розтягнутих арматурних стрижнів.

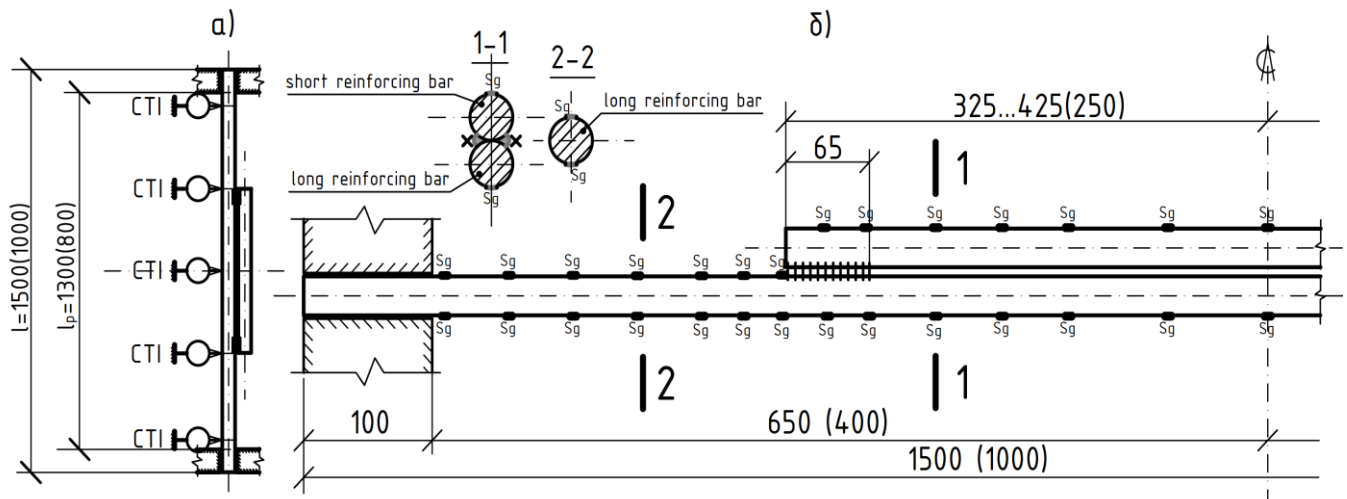


Рис. 3.4 – Схеми розташування приладів при випробуванні арматурного стержня-зразку: а) розташування індикаторів годинникового типу (ІГТ) при вимірюванні горизонтального переміщення перерізів зразку за серією І (в дужках номінальна та розрахункова довжина зразку за серіями II-VI); б) розташування місць улаштування тензодатчиків (Т) типу ПКБ-5-100 для виміру відносних деформацій в крайніх волокнах розрахункових перерізів зразків за серією І (в дужках номінальна та розрахункова довжина зразку за серіями II-VI)

Розподіл зусиль в перерізах елементів арматурних стержнів-зразків досліджувався шляхом вимірювання відносних деформацій в їх крайніх волокнах за допомогою тензодатчиків типу ПКБ-5-100, які були наклеєні ланцюжком по довжині стержнів у кількості 50-70 штук на один зразок (див. схему розташування тензодатчиків на рис. 3.4 та в таблицях 3.1-3.6). Відлік деформацій в перерізах зразків на кожному із 8-12 рівнів навантаження вимірювалися за допомогою напівавтоматичного вимірювача деформацій марки АД-2М. Горизонтальні переміщення стержнів-зразків відносно їх початкового положення фіксувалися за допомогою п'яти індикаторів годинникового типу, які були встановлені поблизу кінців і по середині довшого арматурного стрижня, а також на ділянках поблизу місць його з'єднання з коротким стрижнем (див. схему розташування індикаторів годинникового типу на рис. 3.4).

3.2 Результати проведення експериментальних досліджень.

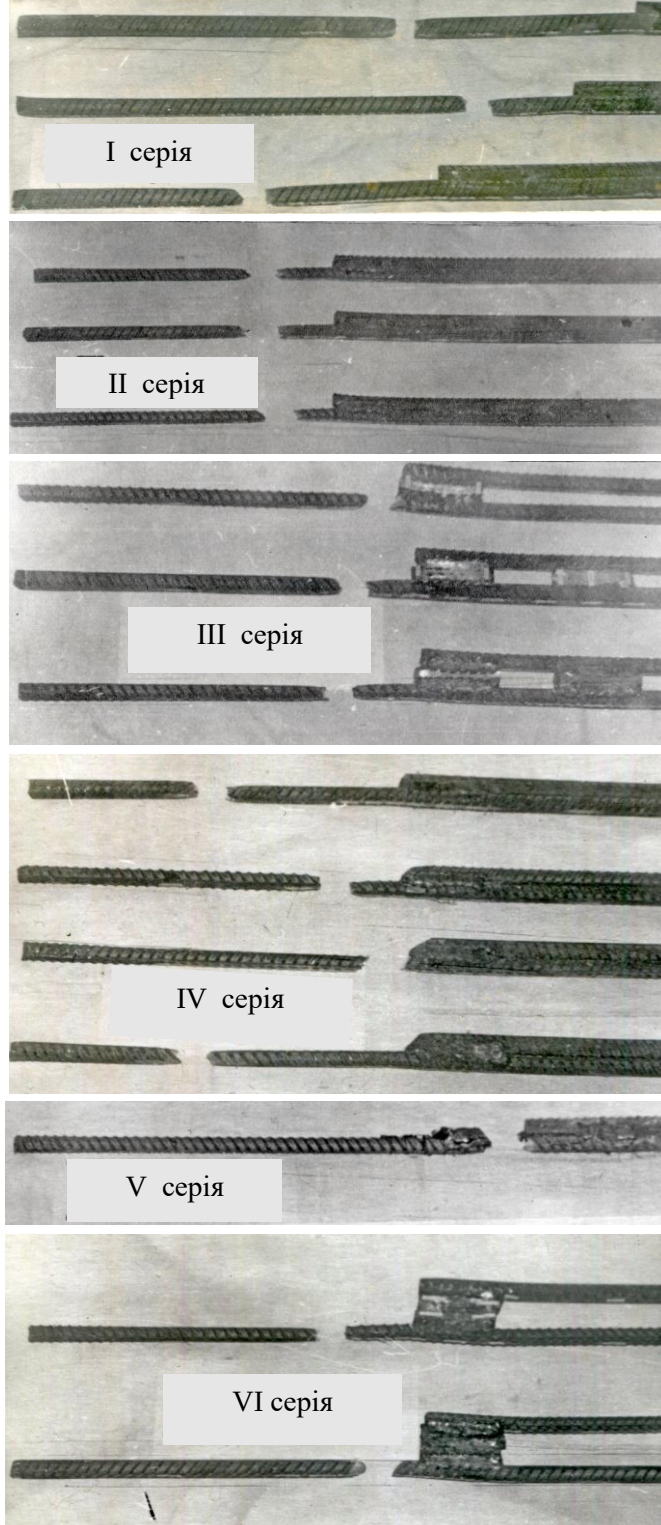


Рис. 3.5 - Характер руйнування та місце розриву довшого арматурного стержня в складених зразках за серіями I-VI, що були випробувані на розтяг

В результаті експериментальних досліджень арматурних стрижнів-зразків був встановлений характер їх руйнування (дивись фото на рис. 3.5).

При пластичному характері руйнування стержнів-зразків відбувався розрив в одному із перерізів довшого арматурного стрижня на відстані рівній 2-м (двом) і більше його діаметрам ($l \geq 30$ мм) від місця обриву короткого арматурного стрижня. Пластичний характер руйнування в окремому перерізі довшого стержня відбувався при значній локалізації його деформації перед руйнуванням з частковим звуженням перерізу (утворенням «шийки»), формуванням «чашкового зламу» через розвиток тріщин і мікропор та подальшим зрізом матеріалу по площинам максимальних дотичних напружень, що призводить до формування dna та конусних стінок у місці розриву.

На рисунках 3.6-3.11 приведені графіки розподілу горизонтальних переміщень (μ , мм) арматурних стержнів-зразків №№1-16 за серіями I-VI залежно від рівня їх завантаження $\eta = N/N_u$.

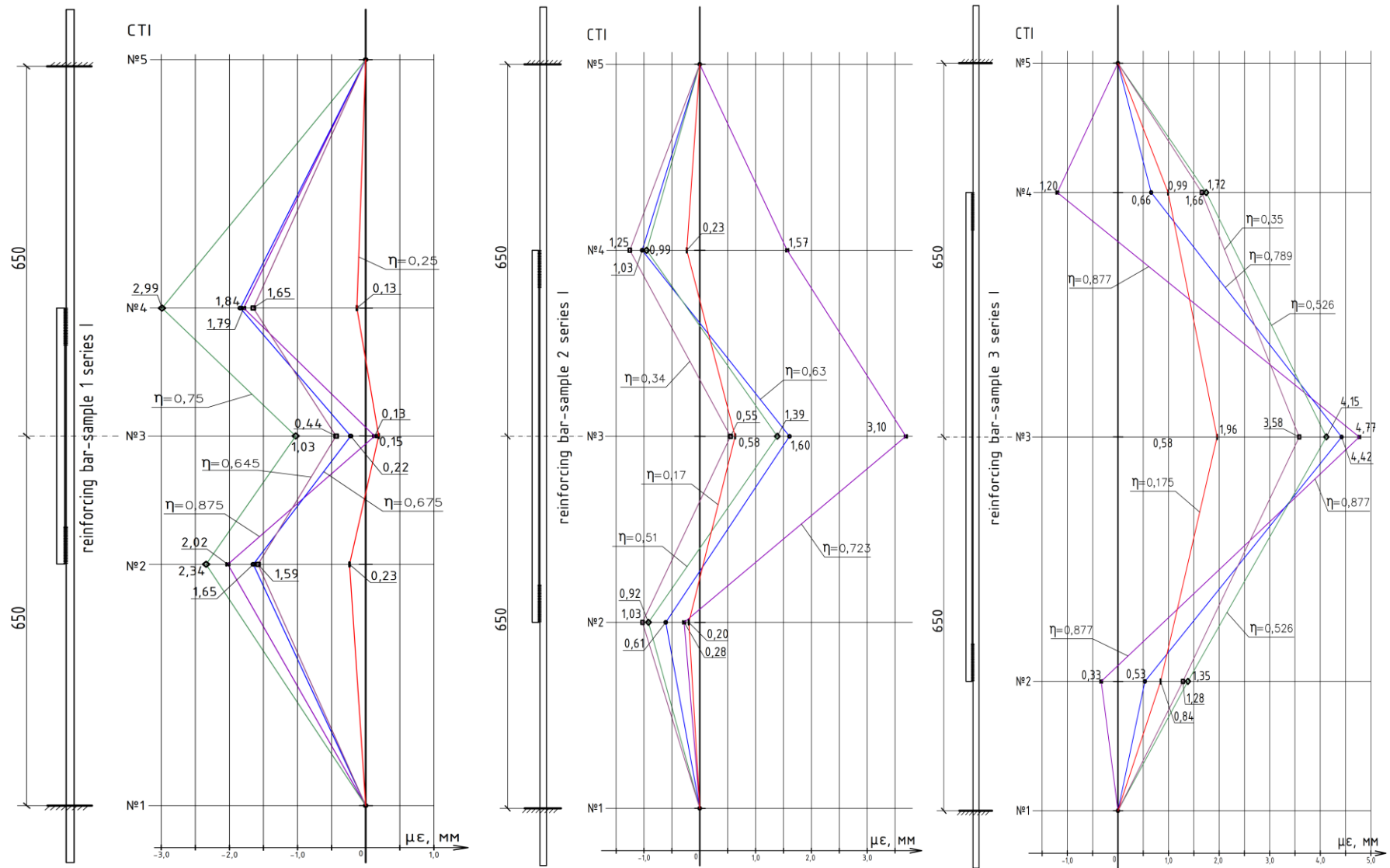


Рис. 3.6 – Графіки розподілу горизонтальних переміщень ($\mu\epsilon$, мм) арматурних стержнів-зразків №№1-3 за серією I з номінальною довжиною $l=1,5$ м (розражункова довжина арматурних стержнів-зразків становить $l_p=1,3$ м) залежно від рівня їх завантаження $\eta=N/N_u$

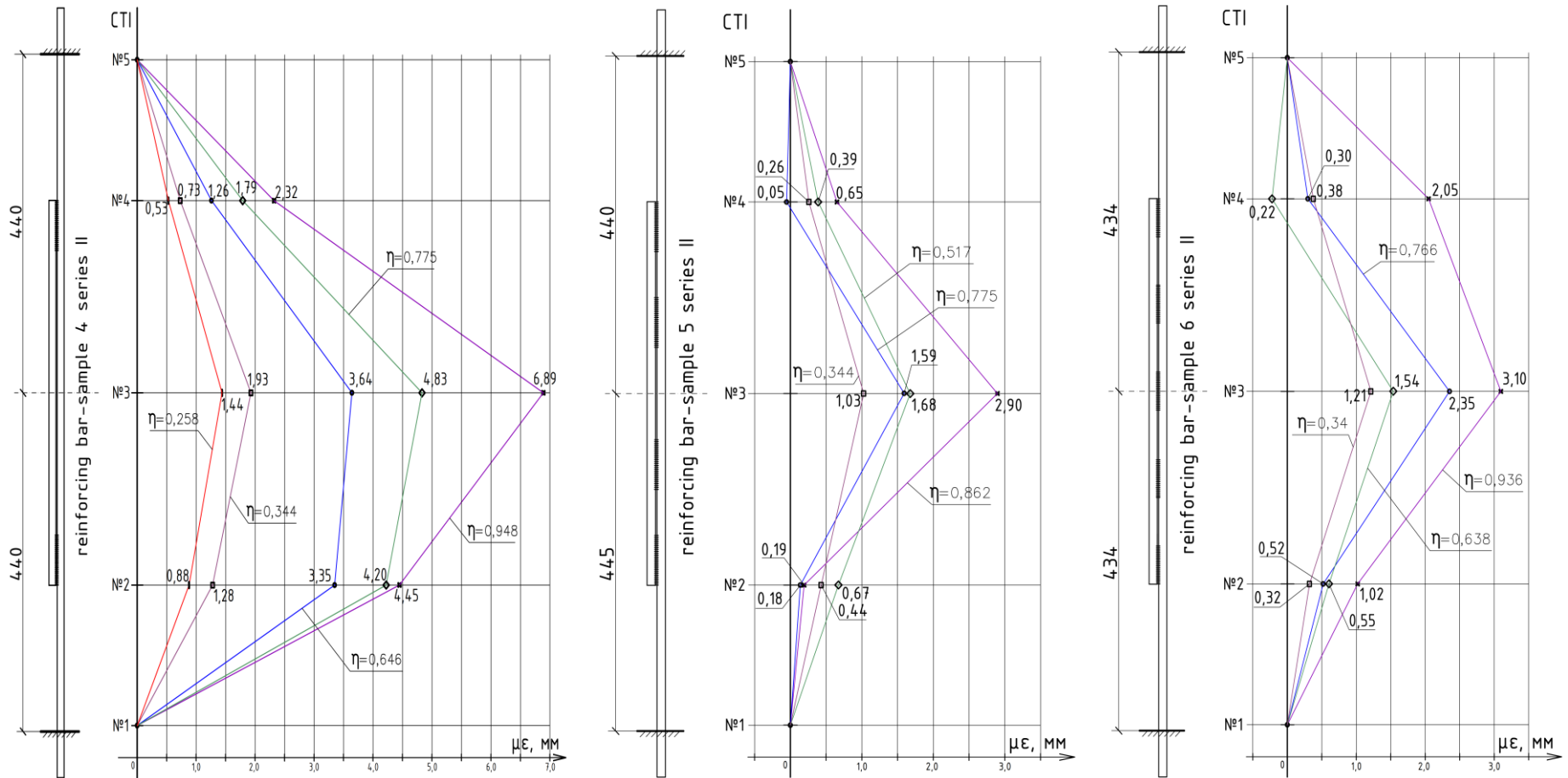


Рис. 3.7 – Графіки розподілу горизонтальних переміщень ($\mu\epsilon$, мм) арматурних стержнів-вразків №№4-6 за серією II з номінальною довжиною $l=1,0$ м (розрахункова довжина арматурних стержнів-вразків становить: №4 - $l_p=0,880$ м; №5 - $l_p=0,885$ м; №6 - $l_p=0,868$ м) залежно від рівня їх завантаження $\eta=N/N_u$

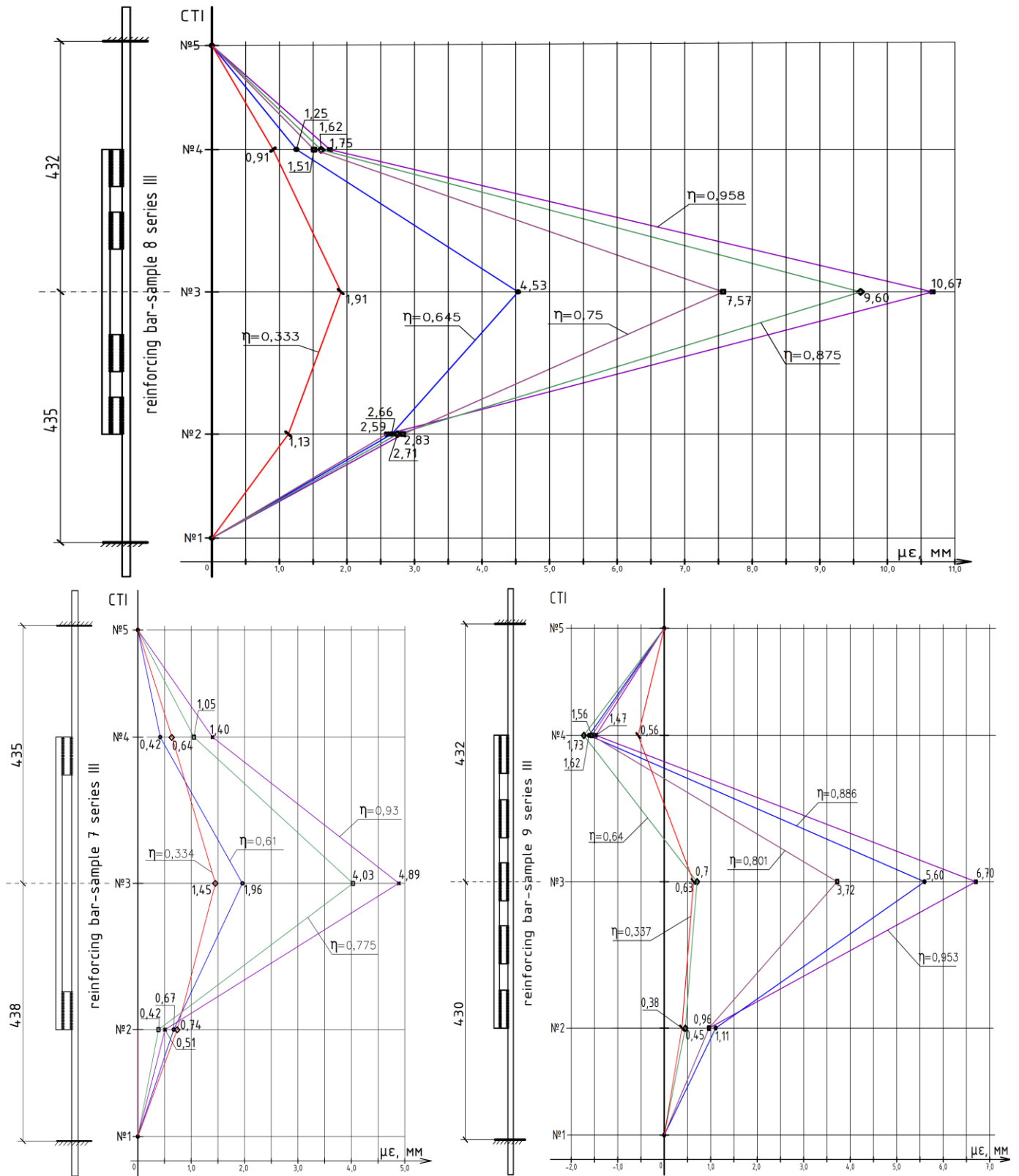


Рис. 3.8 – Графіки розподілу горизонтальних переміщень (με, мм) арматурних стержнів-вразків №№7-9 за серією III з номінальною довжиною $l=1,0$ м (розрахункова довжина відповідно становить для стержня: № 7 - $l_p=0,873$ м; №8 - $l_p=0,867$ м; № 9 - $l_p=0,862$ м;) залежно від рівня їх завантаження $\eta=N/N_u$

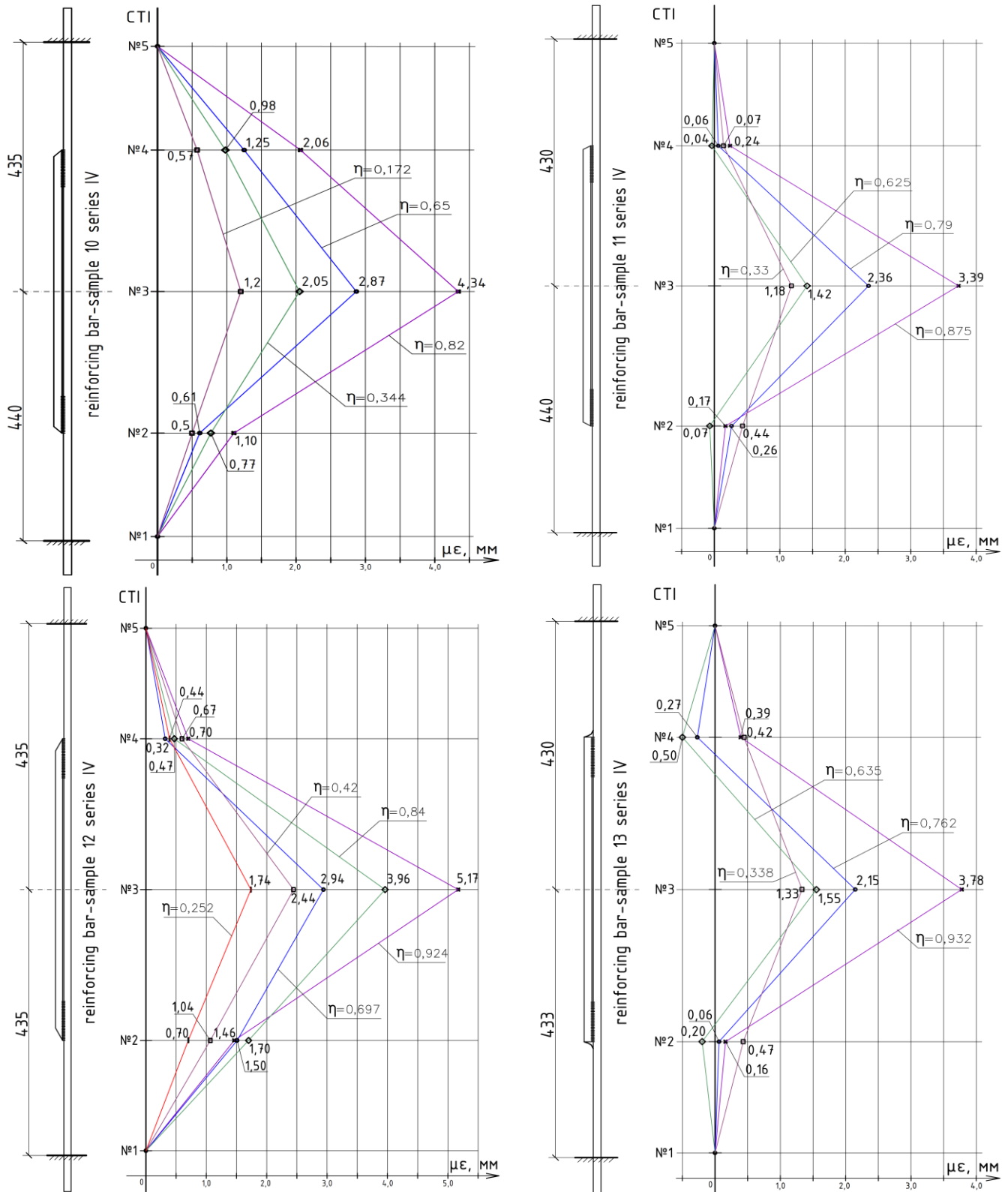


Рис. 3.9 – Графік розподілу горизонтальних переміщень ($\mu\epsilon$, мм) арматурних стержнів-зразків №№10-13 за серією IV з номінальною довжиною $l=1,0$ м (розражункова довжина стержнів становить: №10 - $l_p=0,875$ м; №11 - $l_p=0,870$ м; №12 - $l_p=0,875$ м; №13 - $l_p=0,863$ м) залежно від рівня його завантаження $\eta=N/N_u$

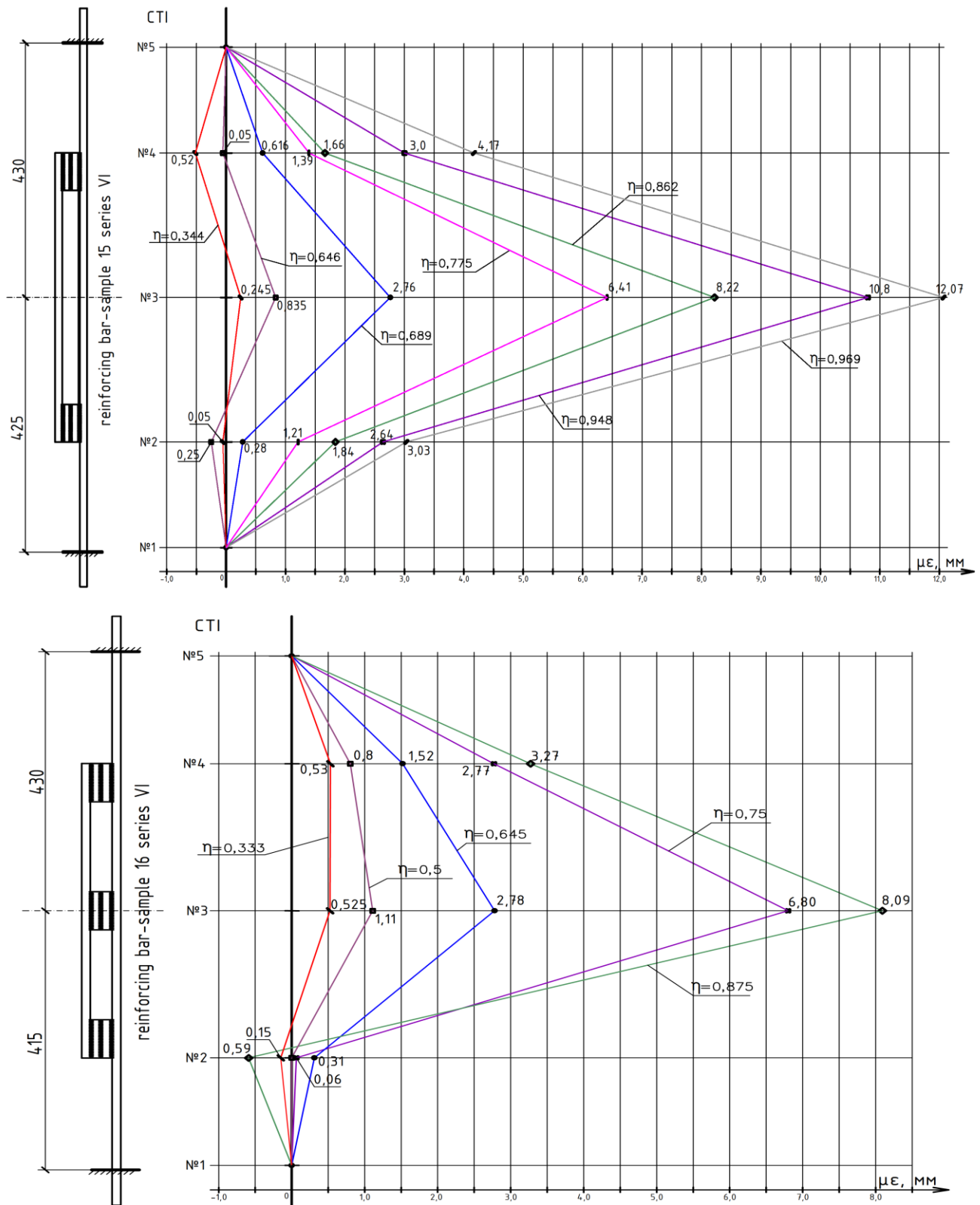


Рис. 3.10 – Графіки розподілу горизонтальних переміщень ($\mu\epsilon$, мм) арматурних стержнів-зразків №15 і №16 за серією VI з номінальною довжиною $l=1,0$ м (розражункова довжина стержнів становить №15 - $l_p=0,855$ м, №16 - $l_p=0,845$ м) залежно від рівня їх завантаження $\eta=N/N_u$.

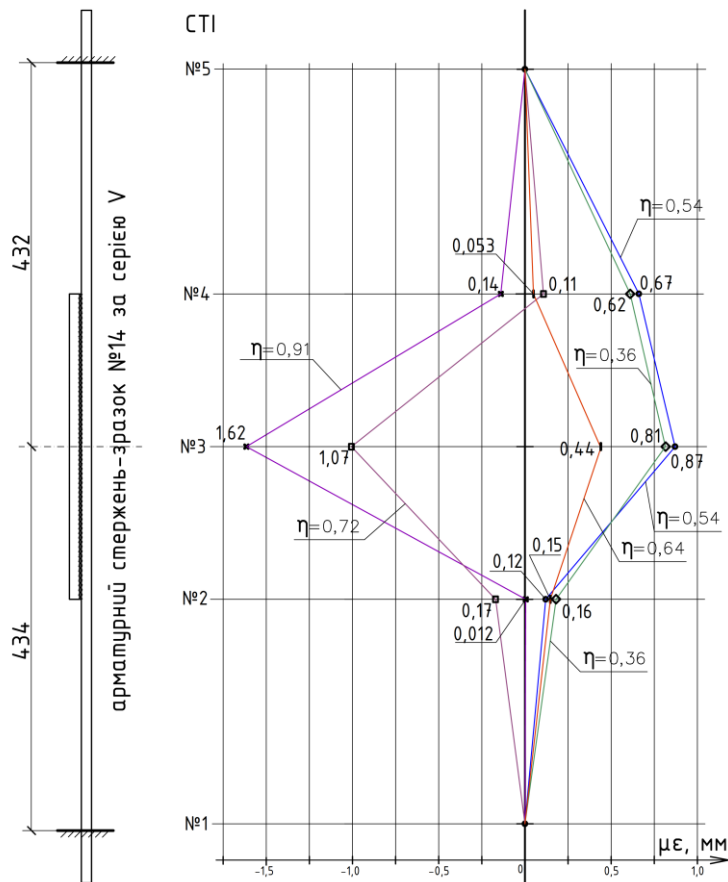


Рис. 3.11 – Графік розподілу горизонтальних переміщень ($\mu\epsilon$, мм) арматурного стержня-зразку №14 за серією V з номінальною довжиною $l=1,0$ м (розражункова довжина $l_p=0,866$ м) залежно від рівня його навантаження $\eta=N/N_u$.

Аналіз результатів та графіків розподілу горизонтальних переміщень ($\mu\epsilon$) арматурних стержнів-зразків №№1-16 за серією I-VI залежно від рівня їх навантаження $\eta=N/N_u$ дозволив зробити наступні висновки щодо впливу різних факторів на величину їх граничного вигину та загальну деформативність, а саме:

- при збільшенні кількості зварних з'єднань між довшим стержнем і коротким величина вигину зменшується більше ніж у 2-а рази;
- при збільшенні величини ексцентриситету прикладення навантаження у два-три рази величина вигину збільшується відповідно у 1,5...2,5 рази;
- при збільшенні величини довжини короткого стержня по відношенню до довжини довшого відбувається збільшення величини граничного вигину: при відношенні довжин коротких стержнів в зразках №1 і №2 на 44,5% - величина граничного вигину збільшилася у 3-и рази, а при відношенні довжин коротких стержнів в зразках №1 і №3 на 88,9% - величина граничного вигину збільшилася у 4,6 разів;
- на загальну деформативність окремих стержнів-зразків у пружній і пружно-пластичній стадіях мав вплив згинальний момент (M_s), який виникає у місцях обриву короткого стержня по відношенню до довшого (перепаду перерізів у стержнях-зразках): в результаті дії вигинального моменту локальні переміщення

окремих перерізів стержнів-зразків поблизу місць обриву у пружній і пружно-пластичній стадіях (при рівнях завантаження $\eta = N/N_u = 0,13 \dots 0,75$) мали від'ємне значення переміщення у горизонтальній площині по відношенню до величини кінцевого граничного вигину зразків;

- в арматурному стержні-зразку №14, в якому з'єднання короткого стержня з довшим було виконане по всій довжині за допомогою епоксидної суміші (смоли), в пружній стадії при рівнях навантаження $\eta = N/N_u = 0,15 \dots 0,65$ горизонтальне переміщення перерізів і загальний вигин відбувався у бік довшого із стержнів зразка, а після утворення тріщин зрізу і руйнувань епоксидного шару з'єднання по довжині з одного із боків короткого стержня зразку (при рівнях навантаження $\eta > 0,65$) - горизонтальне переміщення перерізів і загальний вигин зразка відбувався у бік короткого стержня;
- в арматурних стержнях-зразках IV-й серії обрізання під кутом $\alpha = 60^\circ, 45^\circ$ і 30° торцевої ділянки короткого стержня у місці переходу перерізів (біля місця обриву) та поступового зварного переходу за рахунок наплавлення металу (дивись таблицю 3.4) не мали значного впливу на розподіл горизонтальних переміщень і величину загального вигину: величина граничного загального вигину стержнів-зразків №№10-13 (див. рис. 3.9) змінювалася в межах $f_{гп} = 3,5 \dots 5,5$ мм.

За допомогою тензодатчиків типу ПКБ-5-100, які були наклеєні ланцюжком по довжині стержнів №№1-16, був визначений розподіл поздовжнього зусилля розтягу N_s між довшим і коротким стрижнем в пружній і пружно-пластичній стадіях напружено-деформованого стану стержнів-зразків при рівнях навантаження $\eta = N/N_u = 0,1 \dots 0,85$, який в експериментах змінюється у відношенні від 2:1 до 5:1 залежно від конструктивного рішення і розмірів стержнів-зразків.

В результаті зіставлення експериментальних величин поздовжнього зусилля N_y , які були отримані при випробуванні стержнів-зразків на межі умовної плинності, із величиною поздовжнього зусилля N_{ye} при випробуванні еталонного зразка із окремого арматурного стержня були отримані величини коефіцієнтів зниження умовної межі

плинності γ_{sy} та концентрації напруження $K_{\sigma y}$ на початку пружно-пластичної стадії роботи їх перерізів, які приведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Граничні зусилля розтягу (N_y) в арматурних зразках та величини коефіцієнтів пониження напруження (γ_{sy}) та концентрації напруження ($K_{\sigma y}$) в пружно-пластичній стадії на межі плинності

Номер серії	Номер зразка	Поздовжнє зусилля N_y на межі плинності за діаграмою розподілу зусилля на УИМ-50: еталонного зразка із окремого арматурного стержня N_{ye} ; складеного зразка із довшого та короткого арматурних стержнів N_{yi} , кН		Коефіцієнти пониження напруження γ_{sy} та концентрації напруження $K_{\sigma y}$ в перерізах довшого стержня складеного зразку в його пружно-пластичній стадії на межі плинності	
		N_{ye}	N_{yi}	γ_{sy}	$K_{\sigma y}$
I	1	86,16	73,15	0,849	1,178
	2		72,03	0,836	1,196
	3		74,70	0,867	1,153
II	4		80,73	0,937	1,067
	5		74,35	0,863	1,158
	6		78,57	0,912	1,096
III	7		67,63	0,785	1,274
	8		82,80	0,961	1,040
	9		67,80	0,787	1,271
IV	10		75,90	0,881	1,135
	11		73,06	0,848	1,179
	12		75,65	0,878	1,139
	13		79,35	0,921	1,085
V	14		78,23	0,908	1,101
VI	15		77,63	0,901	1,110
	16		78,83	0,915	1,093

В результаті зіставлення експериментальних величин поздовжнього зусилля N_u , які були отримані при випробуванні стержнів-зразків на межі міцності, із величиною поздовжнього зусилля N_{ue} при випробуванні еталонного зразка із окремого арматурного стержня були отримані величини коефіцієнтів зниження міцності γ_{su} та концентрації напруження $K_{\sigma u}$ в пластичній граничній стадії роботи їх перерізів, які приведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Граничні зусилля розтягу (N_u) в арматурних зразках та величини коефіцієнтів пониження міцності (γ_{su}) та концентрації напруження (K_{su}) в пластичній стадії на межі міцності

Номер серії	Номер зразка	Поздовжнє зусилля N_u на межі міцності за діаграмою розподілу зусилля на УИМ-50: еталонного стержня N_{ue} ; складеного зразка із довшого та короткого арматурних стержнів N_{ui} , кН		Коефіцієнти пониження міцності γ_{su} та концентрації напруження K_{su} в перерізах довшого стержня складеного зразку в його пластичні стадії на межі міцності	
		N_{ue}	N_{ui}	γ_{su}	K_{su}
I	1	129,6	120,01	0,926	1,080
	2		123,38	0,952	1,050
	3		116,90	0,902	1,108
II	4		118,06	0,911	1,097
	5		122,60	0,946	1,057
	6		121,43	0,937	1,067
III	7		119,88	0,925	1,081
	8		120,01	0,926	1,080
	9		121,95	0,941	1,062
IV	10		120,40	0,929	1,076
	11		113,27	0,874	1,144
	12		119,62	0,923	1,083
	13		123,77	0,955	1,047
V	14		122,60	0,946	1,057
VI	15		120,14	0,927	1,078
	16		123,00	0,949	1,054

3.3 Висновки за третім розділом.

В результаті експериментальних досліджень були отримані дані, які дозволили зробити наступні висновки про розподіл зусиль та міцність при позацентровому розтягуванні арматурних стержнів-зразків складеного перерізу (зварених по довжині між собою довшого і короткого арматурних стрижнів):

- руйнування у більшості випадків стержнів-зразків відбувається у визначеному перерізі довшого арматурного стрижня на ділянці довжиною $l=0...4d$ (де d діаметр довшого арматурного стрижня) від краю короткого стрижня, на якому

відбувається структурна зміна властивостей арматурної сталі стрижня під час електродугового зварювання. Крихкий характер руйнування мали 6% зразків від загальної їх кількості. Експериментальні значення коефіцієнта зниження міцності на розтяг перерізів довшого арматурного стрижня поблизу ділянок зварювання з коротким стрижнем в порівнянні з міцністю на розтяг еталонного окремого арматурного стрижня, перерізи якого не зазнали впливу високої температури від електродугового зварювання, склали: на межі пластичності $\gamma_{sy}=0,785...0,961$; на межі міцності – $\gamma_{su}=0,874...0,955$;

- у крайніх волокнах поперечного перерізу більш довшого арматурного стрижня зразків біля місця обриву короткого стрижня при рівні навантаження $\eta=N_s/N_u=0,6-0,7$ виникають напруження, які перевищують величину напруження на межі пластичності при цьому величина середнього напруження в перерізах становить $\sigma_s \geq 0,6 \times f_{sy}$. Експериментальні значення величини коефіцієнту концентрації напруження ($K_{\sigma y}$) в поперечних перерізах довшого стержня зразків в їх пружно-пластичні стадії на межі плинності змінювалися в межах $K_{\sigma y}=1,04...1,28$. Експериментальні значення величини коефіцієнту концентрації напруження ($K_{\sigma u}$) в поперечних перерізах довшого стержня зразків в його пластичні стадії на межі міцності змінювалися в межах $K_{\sigma u}=1,047...1,145$;
- розподіл поздовжнього зусилля розтягу N_s між довшим і коротким стрижнем в експериментах змінюється у відношенні від 2:1 до 5:1 залежно від стадії напружено-деформованого стану стержнів-зразків.
- При розрахунку і проектуванні конструктивних елементів підсилення залізобетонних балкових конструкцій і елементів шляхом нарощування площі поздовжньої арматури в розтягнутій зоні їх перерізів за допомогою додаткових арматурних стержнів, які зварюються з існуючими, як, наприклад, було виконано в роботі [22], необхідно враховувати пониження розрахункового опору на розтяг арматурної сталі їх стрижнів шляхом його корегування за допомогою величин запропонованих в таблиці 3.6 коефіцієнтів зниження міцності на розтяг перерізів (γ_{sy}) та концентрації напруження ($K_{\sigma y}$).

РОЗДІЛ 4
ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ НА ЗГИН ТА
ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДСИЛЕННЯ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ (ЕЛЕМЕНТІВ)
ПЕРЕКРИТТІВ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

4.1 Розрахунок міцності на згин і проектування підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки.

4.1.1 Послідовність розрахунку міцності на згин та проектування конструктивних компонентів (елементів) підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки

Розрахунок і проектування конструктивних компонентів (елементів) підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки виконуємо в такій послідовності:

- визначення величин розрахункових навантажень та внутрішніх зусиль в розрахункових комбінованих перерізах поздовжніх ребер і плитних ділянок збірних залізобетонних плит перекриття, що підсилюються, прийняття узагальненої розрахункової схеми напружено-деформованого стану приведенного комбінованого перерізу (див. рис. 4.1) при забезпеченні умов міцності на згин в їх розрахунковому перерізі (див. рис. 4.2);
- визначення площі перерізів армування відповідно горизонтального (A_{sd}) і похилого ($A_{s,inc}$) елементів шпренгельної затяжки при визначеній (заданій) товщині (d) додаткового залізобетонного шару набетонування збірних ребристих плит перекриття, що підсилені, при забезпеченні умов міцності на згин в розрахункових перерізах їх поздовжніх ребер;

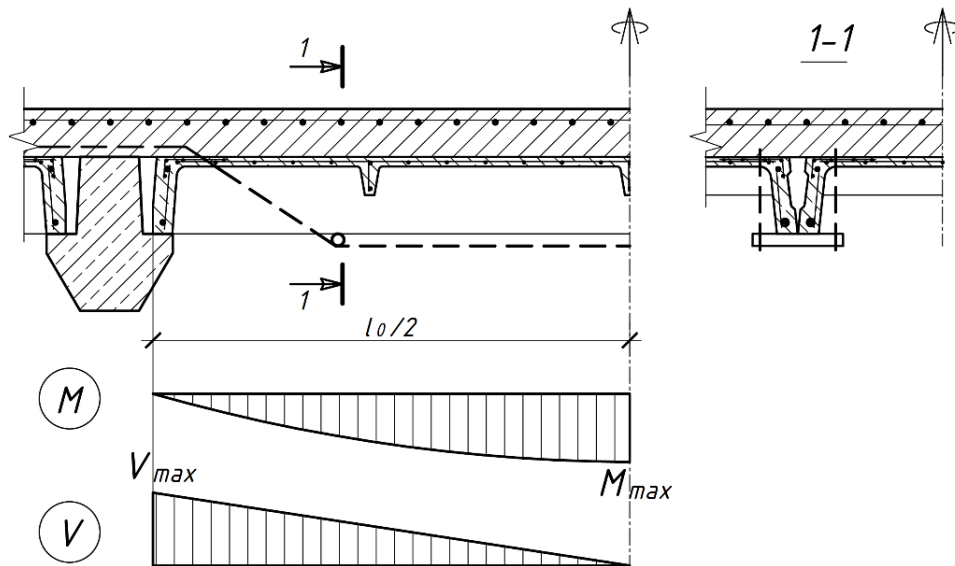


Рис. 4.1 Розрахункова схема поздовжніх ребер збірної залізобетонної плити перекриття, що підсилюється шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки та епюри внутрішніх зусиль при дії на них повного розрахункового навантаження

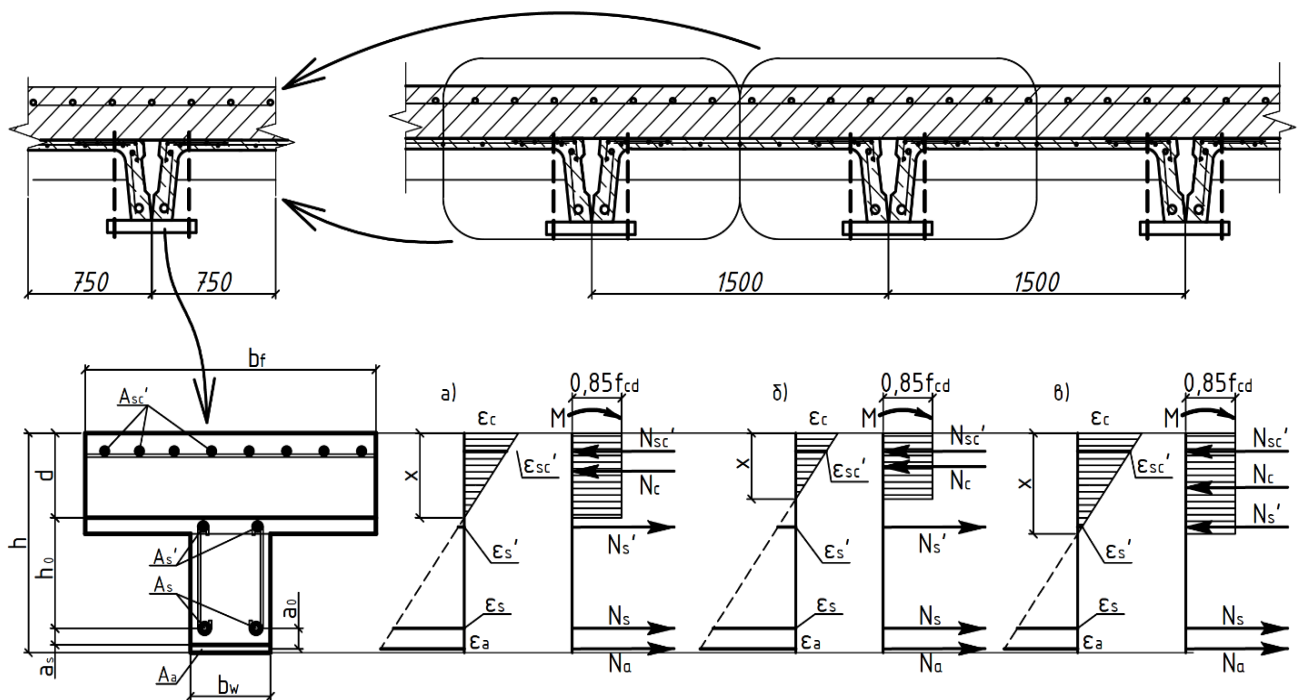


Рис. 4.2 Напружено-деформований стан приведенного комбінованого перерізу поздовжніх ребер збірних залізобетонних плит перекриття, що підсилюються шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки

- визначення зусилля зсуву (V_{hv}) між верхньою площиною збірної залізобетонної плити перекриття і нижньою площиною додаткового залізобетонного шару набетонування залежно від випадку напружено-деформованого стану в її розрахунковому перерізі на згин;
- визначення площі перерізів елементів армування (A_{s1}) і (A_{s2}) плитних ділянок збірних ребристих плит перекриття, що підсилені;
- перевірка дотриманні вимог міцності на зріз в розрахункових перерізах поздовжніх ребер збірних ребристих плит перекриття, що підсилені, та визначення площі перерізів елементів додаткового їх армування у разі недостатньої їх несучої здатності;
- конструювання компонентів (елементів) підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття.

4.1.2 Розрахунок міцності на згин в комбінованому приведеному перерізі залізобетонної ребристої плити перекриття (покриття), яка підсилюється шляхом одночасного нарощування перерізів додатковими залізобетонним шаром і арматурними стержнями відповідно в стиснутій і розтягувальній їх зонах.

Умова рівноваги при забезпеченні умов міцності на згин в розрахункових комбінованих перерізах поздовжніх ребер збірних плит перекриття, що підсилені одночасно нарощуванням стиснутої і розтягнутої зон перерізу, відносно рівнодіючої вісі стисненої зони бетону буде мати вигляд (див. рис. 4.2):

$$M = f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_{sd} \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f'_s A'_s \times (0,5x - a_s), \quad (4.1)$$

де M – згинальний момент в розрахунковому перерізі збірної залізобетонної плити від дії зовнішніх навантажень;

d - товщина додаткового залізобетонного шару набетонування при підсиленні збірних ребристих плит шляхом нарощування їх перерізів;

h_0 – робоча висота перерізу збірної залізобетонної плити, що підсилюється;

f_s – розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, якою армована нижня розтягнута зона поздовжніх ребер збірних плит перекриття;

f'_s – розрахунковий опір на стиск поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, якою армована верхня стиснута зона додаткового залізобетонного шару набетонування, яких здійснюється підсилення збірних плит перекриття;

f_{sd} – розрахунковий опір на розтяг горизонтального елементу шпренгельної зтяжки відповідно норм ДБН В.2.6-198:2014 [162];

a_0 – відстань між геометричними горизонтальними осями існуючої поздовжньої арматури і горизонтальним елементом шпренгельної зтяжки (A_{sd}), яка приймається в рівнянні зі знаком «+» при $h_0 + a_0 \geq h_0$ та зі «-» знаком при $h_0 - a_0 < h_0$;

A_s – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, які встановлені в розтягнутій зоні перерізу збірної залізобетонної плити, що підсилюється;

A_{sd} – сумарна площа перерізу поздовжніх горизонтальних елементів шпренгельної зтяжки, якими додатково здійснюється армування збірної залізобетонної плити, що підсилюється в розтягнутій зоні перерізу;

A'_s – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, котрими здійснюється армування додаткового залізобетонного шару набетонування в стиснутій зоні перерізу збірної залізобетонної плити, що підсилюється;

x – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому комбінованому перерізі на ділянці плити, що сприймає навантаження від згинального моменту (M), яка визначається за залежністю:

$$x = (f_s A_s + f_{sd} A_{sd} + f'_s A'_s) / (f_{cl} b), \quad (4.2)$$

де f_{cl} – розрахунковий опір на стиск важкого бетону відповідно п.3.1 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від його класу, із якого буде

виготовлений (улаштований) додатковий залізобетонний шар набетонування при підсиленні збірної залізобетонної плити;

b – розрахункова ширина комбінованого перерізу підсилення збірної залізобетонної плитного чи балкового конструктивного елементу, яка при розрахунковому тавровому приведеному перерізі дорівнює $b=b_f$.

4.1.3 Визначення площі перерізів армування горизонтального елементу шпренгельної затяжки при визначеній (заданій) товщині (d) додаткового залізобетонного шару набетонування збірних ребристих плит перекриття, що підсилені, при забезпеченні умов міцності на згин в розрахункових перерізах їх поздовжніх ребер.

В умові рівноваги (4.1) невідомими є величини d , A_{sd} , x , A'_s , що ускладнює розрахунок оптимальних (ефективних) їх параметрів при визначених (заданих, прийнятих) величинах зовнішнього навантаження і міцносних характеристиках матеріалів плити і компонентів підсилення. Із рівняння рівноваги (4.1) при $A'_s=0$ і прийнятті однієї із невідомих величин його складових: товщини додаткового залізобетонного шару набетонування (d) чи площі поперечного перерізу поздовжнього елементу шпренгельної затяжки (A_{sd}), шляхом перетворень можемо отримати наступні залежності, за допомогою яких можемо визначити одну із невідомих величин d чи A_{sd} :

$$A_{sd} = \frac{f_c b}{f_{sd}} \times (-2M + f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x_H) - (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x_H) \times (1 \pm d \pm a_0 - 0,5x_H)); \quad (4.3)$$

$$d = \frac{M \pm f_{sd} A_{sd} \cdot a_0}{f_s A_s + f_{sd} A_{sd}} - h_0 - \frac{f_s A_s + f_{sd} A_{sd}}{2 f_c b}, \quad (4.4)$$

де x_H – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому комбінованому перерізі на ділянці плити, що сприймає навантаження від згинального моменту (M), при армуванні його тільки існуючими арматурними стержнями в розтягнутій зоні плити загальною площею A_s , яка визначається за залежністю:

$$x_H = (f_s A_s) / (f_c b). \quad (4.5)$$

Розрахунок величин d, A_{sd} відповідно за залежністю (3) чи (4) не завжди буде оптимальний (ефективний з економічної точки зору), тому що в окремих випадках при нарощуванні перерізу шляхом набетонування встановлення додаткового армування в розтягнутій зоні перерізу може бути непотрібне, бо буде достатньо вже існуючої в ній площі армування (A_s). Тому для удосконалення методики розрахунку компонентів підсилення був запропонований додатковий коефіцієнт (n), який буде враховувати відношення площ армування A_{sd} до A_s .

$$n = A_{sd} / A_s. \quad (4.6)$$

Величину коефіцієнта n визначаємо за залежностями (7)-(9):

$$0,5x_n \cdot n^2 + (h_0 + d \pm a_0 + x_n) \cdot n + (h_0 + d + 0,5x_n - \frac{M}{f_s A_s}) = 0; \quad (4.7)$$

$$D = (h_0 + d \pm a_0 + x_n)^2 - 4 \times 0,5x_n \times (h_0 + d + 0,5x_n - \frac{M}{f_s A_s}); \quad (4.8)$$

$$n_{1,2} = \frac{-(h_0 + d \pm a_0 + x_n) \pm \sqrt{D}}{x_n}. \quad (4.9)$$

При $n \leq 0$ підсилення залізобетонної балкового елементу одночасно шляхом нарощування перерізу в стиснутій і розтягнутій зонах непотрібне, буде достатньо виконати підсилення елементу тільки в стисненій його зоні шляхом улаштування додаткового залізобетонного шару набетонування.

При $n > 0$ площа перерізу поздовжнього елементу затяжки буде становити:

$$A_{sd} = (n + 0,1) \times A_s. \quad (4.10)$$

Визначаємо величину необхідної площі армування (A'_s) залізобетонного шару набетонування в комбінованому перерізі плитного чи балкового елементу за умови рівноваги при забезпеченні умов міцності на згин відносно рівнодіючої вісі поздовжнього армування в його розтягнутій зоні:

$$A'_s = \frac{M - f_c b x \times (h_0 + d - 0,5x)}{f_s \times (h_0 + d - a')}; \quad (4.11)$$

При величині площі армування верхньої стиснутої зони менше нуля ($A'_s \leq 0$), армування виконуємо конструктивно. При $A'_s > 0$ виконуємо корегування

величини площі перерізу поздовжнього елементу зтяжки з урахуванням величин розрахункових опорів на розтяг існуючих арматурних стержнів (f_s) і поздовжнього елементу шпренгельної зтяжки (f_{sd}), що проектується, за залежністю:

$$A_{sd} = f_s / f_{sd} \times (A_s \times (n+0,1) + A'_s). \quad (4.12)$$

Виконуємо перевірку несучої здатності перерізу підсиленої плити при забезпеченні умови міцності на згин в розрахункових перерізах поздовжніх ребер збірних плит перекриття, що підсилені, відносно рівнодіючої осі стисненої зони бетону за залежністю:

$$M \leq f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_{sd} \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f_s A'_s \times (0,5x - a'_s). \quad (4.13)$$

4.1.4 Визначення площі перерізу армування похилого елементу в конструкції шпренгельної зтяжки при визначеній площі її горизонтального елементу.

Площу перерізу похилого елементу ($A_{s,inc}$) шпренгельної зтяжки визначаємо за залежністю з урахуванням кута (α) його нахилу до горизонтальної площини і величин розрахункових опорів на розтяг поздовжнього (f_{sd}) і похилого ($f_{s,inc}$) елементів шпренгельної зтяжки, що проектується:

$$A_{s,inc} = f_{sd} / f_{s,inc} \times A_{sd} / \cos \alpha, \quad (4.14)$$

де $f_{s,inc}$ - розрахунковий опір на розтяг похилої арматури (відгину) $A_{s,inc}$ відповідно п.3.2 норм [12] залежно від її класу, яка є похилим елементом шпренгельної зтяжки і додатковим армуванням - ребра збірних плит перекриття, що підсилюються, на приопорних їх ділянках; α – кут нахилу похилого елементу ($A_{s,inc}$) шпренгельної зтяжки відносно горизонтальної площини.

4.1.5 Визначення зусилля зсуву (V_{hv}) між верхньою площиною збірної залізобетонної плити перекриття і нижньою площиною додаткового залізобетонного шару набетонування залежно від випадку напружено-деформованого стану (НДС) в її розрахунковому перерізі на згин.

Величина сумарного зусилля зсуву (V_{hv}) буде становити:

$$V_{hv} = f_{c1} b_f x + f_s A_s' = f_s A_s + f_{sd} A_{sd}, \text{ при } x \leq d; \quad (4.15)$$

$$V_{hv} = f_{c1} b_f d + f_s A_s' < f_s A_s + f_{sd} A_{sd}, \text{ при } x > d; \quad (4.16)$$

Сумарне зусилля зсуву, яке виникає на межі стикування різних конструктивних компонентів у збірно-монолітних елементах, повинно бути менше міцності на зсув компонентів з'єднувальних елементів:

$$V_{hv} \leq P_{Rd}, \quad (4.17)$$

де P_{Rd} – несуча здатність на зсув різної конструктивної форми компонента з'єднувального елемента, яка визначається згідно норм ДСТУ Б В.2.6-216:2016 [163].

Якщо умова (4.17) задовольняється, то виконують конструювання і розміщення компонентів з'єднувальних елементів по довжині стикування додаткового залізобетонного шару набетонування з полицею збірної залізобетонної ребристої плити залежно від його НДС в розрахунковому перерізі.

4.1.5 Визначення площі перерізів елементів армування плитних ділянок збірних ребристих плит перекриття, що підсилені.

В граничному стані зусилля від дії опорних (M_{on}) і прогінних (M_{np}) моментів від зовнішнього навантаження сприймаються поздовжньою і поперечною арматурою, яка розташовується в розтягнутій зоні розрахункових комбінованих перерізів плитних ділянок збірних плит перекриття. Для визначення армування в перерізі додаткового шару набетонування задаємося величинами захисного шару бетону a_{s1} і a_{s2} відповідно від верхньої і нижньої його граней. Визначаємо площу перерізу армування (A_{s1}) на 1 м ширини плити у верхній зоні додаткового шару набетонування її розрахункового комбінованого перерізу від дії опорного згинального моменту:

$$A_{s1} = M_{on} / (z_1 \times f_{s1}), \quad (4.18)$$

де M_{on} – найбільший за величиною із згинальних моментів в опорних комбінованих перерізах плитних ділянок збірних ребристих плит;

f_{s1} - розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм [12] залежно від її класу;

z_1 – величина відстані від геометричної осі поздовжньої арматури A_{s1} до точки рівноваги в стиснутій зоні розрахункового комбінованого перерізу, яку визначаємо за формулою:

$$z_1 = 0,5t + d - a_{s1}, \quad (4.19)$$

де t – товщина полиці збірної залізобетонної плити перекриття;

a_{s1} - величина відстані від геометричної осі поздовжньої арматури у верхній зоні додаткового залізобетонного шару набетонування до його верхньої грані.

Визначаємо площу перерізу армування (A_{s2}) на 1 м ширини плити у нижній зоні додаткового шару набетонування її розрахункового комбінованого перерізу від дії прогінного згинального моменту:

$$A_{s2} = (M_{np} - f_{s3} \times A_{s3} \times z_1) / (z_2 \times f_{s2}), \quad (4.20)$$

де M_{np} – найбільший за величиною із згинальних моментів в прогінних комбінованих перерізах плитних ділянок збірних ребристих плит;

f_{s2} - розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури A_{s2} відповідно п.3.2 норм [12] залежно від її класу;

A_{s3} – площа перерізу армування верхньої полиці збірної залізобетонної плити, що підсилюється, шириною $b=1$ м;

f_{s3} - розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури A_{s3} відповідно п.3.2 норм [12] залежно від її класу, якою армована верхня полиця збірної залізобетонної плити, що підсилюється, шириною $b=1$ м;

z_2 – величина відстані від геометричної осі поздовжньої арматури A_{s2} до точки рівноваги в стиснутій зоні розрахункового комбінованого перерізу, яку визначаємо за формулою:

$$z_2 = d - a_{s1} - a_{s2}, \quad (4.21)$$

де a_{s2} – величина відстані від геометричної осі поздовжньої арматури A_{s2} у нижній зоні додаткового залізобетонного шару набетонування до його нижньої грані.

4.1.6 Перевірка дотримання вимог міцності на зріз в розрахункових перерізах поздовжніх ребер збірних ребристих плит перекриття, що підсилені, та визначення площі перерізів елементів додаткового їх армування у разі недостатньої їх несучої здатності.

Міцність на зріз в розрахункових перерізах поздовжніх ребер збірних залізобетонних плит перекриття при дії максимального поперечного зусилля V_{max} буде задовольнятися при дотриманні умови:

$$V_{max} \leq V_c + V_{sw} + V_{s,inc}, \quad (4.22)$$

де V_{max} – максимальне поперечне зусилля, яке виникає в поздовжніх ребрах збірних плит перекриття на ділянках поблизу опор;

$V_c, V_{sw}, V_{s,inc}$ – поперечні внутрішні зусилля, які сприймаються відповідно бетоном, арматурними поперечними (вертикальними) і похилими (відгинами) стержнями, які визначаємо за наступними залежностями:

$$V_c = (1 + \phi_f) \times 2\sqrt{f_{c2}} b_w h_0 + 2\sqrt{f_{c1}} b_f d; \quad (4.23)$$

$$V_{sw} = \frac{A_{sw1} f_{sw1} h_0}{s}; \quad (4.24)$$

$$V_{s,inc} = f_{s,inc} \times A_{s,inc} \times \sin \alpha, \quad (4.25)$$

де f_{c2} – розрахунковий опір на стиск важкого бетону відповідно п.3.1 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від його класу, із якого виготовлена (улаштована) збірна залізобетонна плита, що підсилюється;

b_w – ширина ребра приведенного розрахункового комбінованого перерізу збірної плити перекриття, що підсилюється;

b_f – ширина полиці приведенного розрахункового комбінованого перерізу збірної плити перекриття, що підсилюється;

A_{sw1} ; s – площа перерізу (A_{sw1}) вертикальних (поперечних) стержнів (хомутів) і їх крок (s) на приопорних ділянках поздовжніх ребер збірних плит перекриття, що підсилюються;

f_{sw1} – розрахунковий опір на розтяг поперечної (вертикальної) арматури A_{sw1} відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, якою армоване поздовжнє ребро збірних плит перекриття, що підсилюються, на приопорних їх ділянках;

φ_f – коефіцієнт, який враховує вплив стиснених полиць в таврових елементах:

$$\varphi_f = 0,75 - \frac{(b'_f - b_w) \times t}{b_w h_0} \leq 0,5, \text{ де } b'_f \leq b_w + 3t. \quad (4.26)$$

Якщо умова (4.22) не задовольняється, то визначаємо необхідну величину площі додаткових поперечних (вертикальних) елементів (A_{sw2}), за допомогою яких буде забезпечуватися несуча здатність на зріз поздовжніх ребер плит перекриття, що підсилені на приопорних ділянках:

$$A_{sw2} = \frac{V_{\max} - V_c - V_{sw} - V_{s,inc}}{f_{sw2}}, \quad (4.27)$$

де f_{sw2} – розрахунковий опір на розтяг додаткового елемента поперечного (вертикального) армування A_{sw2} відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] чи ДБН В.2.6-198:2014 [162] залежно від її класу чи марки сталі.

4.1.7 Конструювання компонентів (елементів) підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття, яке здійснюється шляхом нарощування перерізів додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки.

Проектування конструктивних елементів підсилення залізобетонних ребристих плит показано на прикладі підсилення залізобетонного перекриття підвальних приміщень складської будівлі з неповним несучим каркасом (див. рис. 4.3) при улаштуванні в них споруди з приміщеннями подвійного призначення (СПП) під укриття IV-го класу, яке повинне сприймати квазістатичне еквівалентне навантаження величиною $\Delta P_{ex} = P_1 = 100$ кПа згідно вимог п. 14.1.2.2 ДБН В.2.2-5:2023 [164]. Перекриття підвалу улаштоване із збірних залізобетонних ребристих плит за серією ИИ24-1/70 розмірами у плані $L \times B = 5,6 \times 1,5$ м (марок

ИП1-2...ИП1-6) та $L \times B = 5,6 \times 0,75$ м (марок ИПЗ-1...ИПЗ-5), висотою перерізу $h = 400$ мм та ригелів таврового перерізу. Товщина полиці плит становить $h_{пол} = 50$ мм, висота поперечних ребер, які встановлені з кроком $s = 1,5$ м в прогоні плит марок ИП1-2...ИП1-6, - $h_p = 200$ мм, а крайніх опорних поперечних ребер - $h_p = 400$ мм. Плити перекриття за серією ИИ24-1/70 виготовлені із бетону марок М200 і М300, армування поздовжніх ребер виконане із плоских арматурних каркасів, які улаштовані в розтягненій зоні – із арматурних стержнів діаметрами $\varnothing 18... \varnothing 28$ мм класу А-III (А400 С), в стисненій зоні - із арматурних стержнів діаметрами $\varnothing 8, \varnothing 10$ мм класу А-III (А400 С), поперечне армування на ділянках поблизу опор - із арматурних стержнів діаметрами $\varnothing 8$ і $\varnothing 10$ мм класу А-III (А400 С), які встановлені з кроком $s = 150$ мм.

Армування полиць плит улаштоване плоскими сітками із арматурних стержнів $\varnothing 4$ і $\varnothing 5$ мм класу Вр-I, які встановлені з кроком $s = 200$ мм у поздовжньому і поперечному напрямках плит.

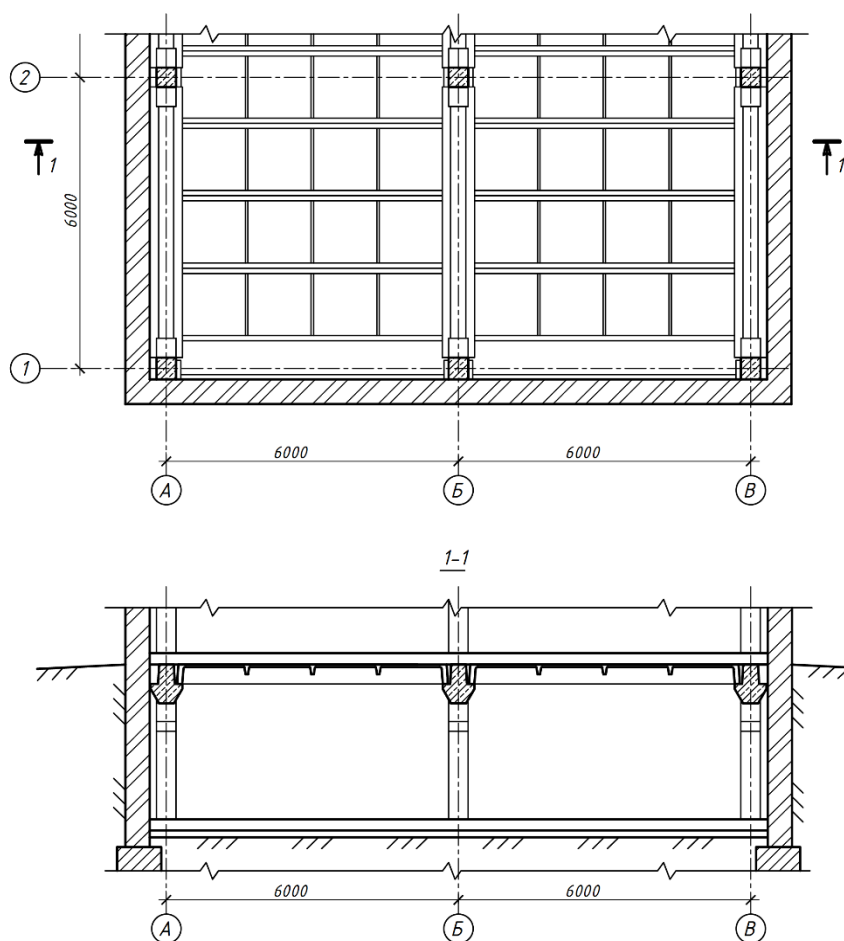


Рис. 4.3 Фрагмент плану перекриття складської будівлі (вигляд знизу) та її розріз на рівні підвального поверху

В результаті інструментального обстеження неруйнівним методом була встановлена міцність бетону на стиск в плитах перекриття підвального приміщення, яка відповідає марці бетону М250 (клас бетону В20; С16/20; $f_{cd} = f_{c2} = 11,5$ МПа). Також в результаті інструментального обстеження була встановлена товщина захисного шару бетону ($t=30$ мм) між нижньою площиною ребра плити і зовнішньою гранню нижнього поздовжнього арматурного стержня, який виготовлений діаметром $\varnothing 20$ мм, класу А-III ($A_s = 3,14$ см²), що відповідає марці плити ІП1-2, яка запроектована на розрахункове повне навантаження $q=1,2$ т/м³, і встановлена величина між його поздовжньою віссю і нижньою площиною ребра плити: $a=40$ мм, тоді робоча висота перерізу поздовжнього ребра при його армуванні в розтягнутій зоні одним поздовжнім стержнем $\varnothing 20$ мм, класу А-III становить $h_0 = h - a - \varnothing/2 = 360$ мм. Поперечне армування поздовжніх ребер плити марки ІП1-2 улаштоване із стержнів діаметром $\varnothing 8$ мм ($A_{sw} = 0,503$ см²) класу А-III (А400 С), які встановлені на приопорних ділянках з кроком $s=150$ мм. Армування полиць плити перекриття марки ІП1-2 улаштоване плоскими сітками із арматурних стержнів $\varnothing 4$ мм класу Вр-I, які встановлені з кроком $s=200$ мм у поздовжньому і поперечному напрямках плит.

Конструктивні компоненти (елементи) підсилення збірних залізобетонних плит перекриття шляхом нарощування їх перерізу улаштовані: додатковий залізобетонний шар набетонування, товщиною $d=300$ мм - із бетону класу С25/30 (В30) $f_{cd} = f_{c1} = 17,0$ МПа; армування - із стержнів арматурної сталі класу А400С; горизонтальний елемент затяжки – із прокатного гарячекатаного фасонного і листового металу марки сталі С245; похилий елемент і додаткові вертикальні елементи шпренгельної затяжки - із прокату гарячекатаного круглого марки сталі С355.

Визначаємо величини внутрішніх зусиль в розрахункових комбінованих перерізах поздовжнього ребра і плитних ділянках збірної залізобетонної плити перекриття, що підсилюється.

Розрахункове погонне навантаження на поздовжнє ребро плити становило:

$$q = (q_n + p) \times B / 2 = (13,06 + 120) \times 15 / 2 = 99,795 \text{ кН} / \text{м}$$

де $q_n = 3,25 + 0,3 \times 25 \times 1,1 + 0,05 \times 24 \times 1,3 = 13,06 \text{ кПа}$ – постійне сумарне розрахункове навантаження від ваги: збірної ребристої плити перекриття на поздовжнє ребро $q_{nl} = 3,25 \text{ кН/м}^2$ за серією ИИ24-01/70; додаткового залізобетонного шару набетонування щільністю $\gamma_{зб} = 25 \text{ кН/м}^3$, мінімальною товщиною $d = 300 \text{ мм}$ (згідно вимог п. 14.2.3.4 норм [11]); конструкції мозаїчної бетонної підлоги з середньою щільністю $\gamma_n = 24 \text{ кН/м}^3$, товщиною $h_n \geq 50 \text{ мм}$; $p = P_1 \times k_\partial = 100 \times 1,2 = 120 \text{ кПа}$ – розрахункове квазістатичного еквівалентного навантаження на 1 м^2 від дії надмірного тиску повітряної ударної хвилі згідно вимог п. 14.1.1.1 і даних табл. А1 в додатку А норм ДБН В.2.2-5:2023 [164].

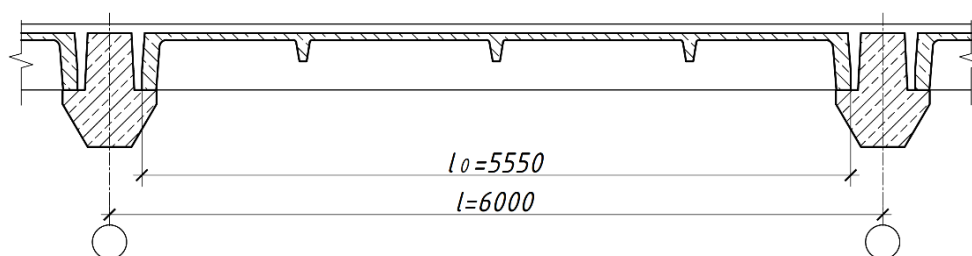


Рис. 4.4. Розрахунковий прогін збірної залізобетонної ребристої плити перекриття, що підсилюється

Визначаємо величини внутрішніх зусиль в розрахункових комбінованих перерізах поздовжнього ребра і плитних ділянках збірної залізобетонної плити перекриття, що підсилюється, яка має розрахунковий прогін величиною (l_0) (див. рис. 4.4):

$$M_{\max} = q \times l_0^2 / 8 = 99,795 \times 5,55^2 / 8 = 384,24 \text{ кНм}$$

$$V_{\max} = q \times l_0 / 2 = 99,795 \times 5,55 / 2 = 276,93 \text{ кНм}$$

$$M_{np} = \alpha \times q_{nl} \times l_1 \times l_2 = 0,0179 \times 131,185 \times 1,245 \times 1,25 = 3,654 \text{ кНм}$$

$$M_{on} = \beta \times q_{nl} \times l_1 \times l_2 = 0,0417 \times 131,185 \times 1,245 \times 1,25 = 8,513 \text{ кНм}$$

де $l_1 = 1,245 \text{ м}$ – розрахунковий прогін плитної ділянки збірної залізобетонної плити перекриття у поперечному її напрямку;
 $l_2 = 1,25 \text{ м}$ – розрахунковий прогін плитної ділянки збірної залізобетонної плити перекриття у поздовжньому її напрямку;

α, β – емпіричні коефіцієнти, які враховують відношення сторін плитної ділянки збірної плити l_2 / l_1 і тип її обпирання, були прийняті для випадку защемлення її усіх чотирьох сторін, коли $l_2 / l_1 = 1$;

$q_{пл} = (0,05 + 0,3) \times 25 \times 1,1 + 0,05 \times 24 \times 1,3 + 100 \times 1,2 = 131,185 \text{ кПа}$ – сумарне повне розрахункове навантаження, яке діє на плитні ділянки збірних плит перекриття, що підсилюються.

Результати розрахунків. В результаті розрахунків за вище викладеними залежностями (4.5-4.12), (4.14), (4.18-4.21) були отримані значення величин: коефіцієнта $n=3,655$; площі горизонтального елемента затяжки $A_{sd} = 13,4 \text{ см}^2$ (при $f_s = 365 \text{ МПа}$) і $A_{sd} = 22,64 \text{ см}^2$ (при $f_s = 216 \text{ МПа}$); площі похилого елемента затяжки $A_{s,inc} = 19,0 \text{ см}^2$ (при $f_s = 365 \text{ МПа}$); площі армування верхньої зони додаткового залізобетонного шару набетонування у поздовжньому напрямку плити $A'_s = 1,6 \text{ см}^2$; площі армування верхньої і нижньої зон додаткового залізобетонного шару набетонування у поперечному напрямку плити відповідно $A_{s1} = 0,79 \text{ см}^2$ і $A_{s2} < 0$ (додаткове армування непотрібне, так як армування комбінованого перерізу плити виконане арматурними стержнями $5\varnothing 4 \text{ мм}$ ($\Sigma A = 0,982 \text{ см}^2$), класу Вр-I, тому армування плитної ділянки збірної плити перекриття марки ИП1-2 в її прогоні є достатнім).

Конструювання підсилення збірних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки. Горизонтальний елемент шпренгельної затяжки проектуємо із прокатного профілю, а її похилий елемент із прокату круглого гарячекатаного (див. рис. 4.5), з'єднання між собою – за допомогою болтового кріплення, що дозволить здійснити поелементне їх кріплення в проектне положення та включення в роботу з повздовжніми ребрами плити, що підсилюються.

Конструктивні рішення щодо проектування компонентів (елементів) комбінованих розрахункових перерізів при підсиленні поздовжніх ребер двох сумісних збірних залізобетонних плит перекриття підвального приміщення будівлі приведені на рис. 4.5, рис. 4.6 і рис. 4.7.

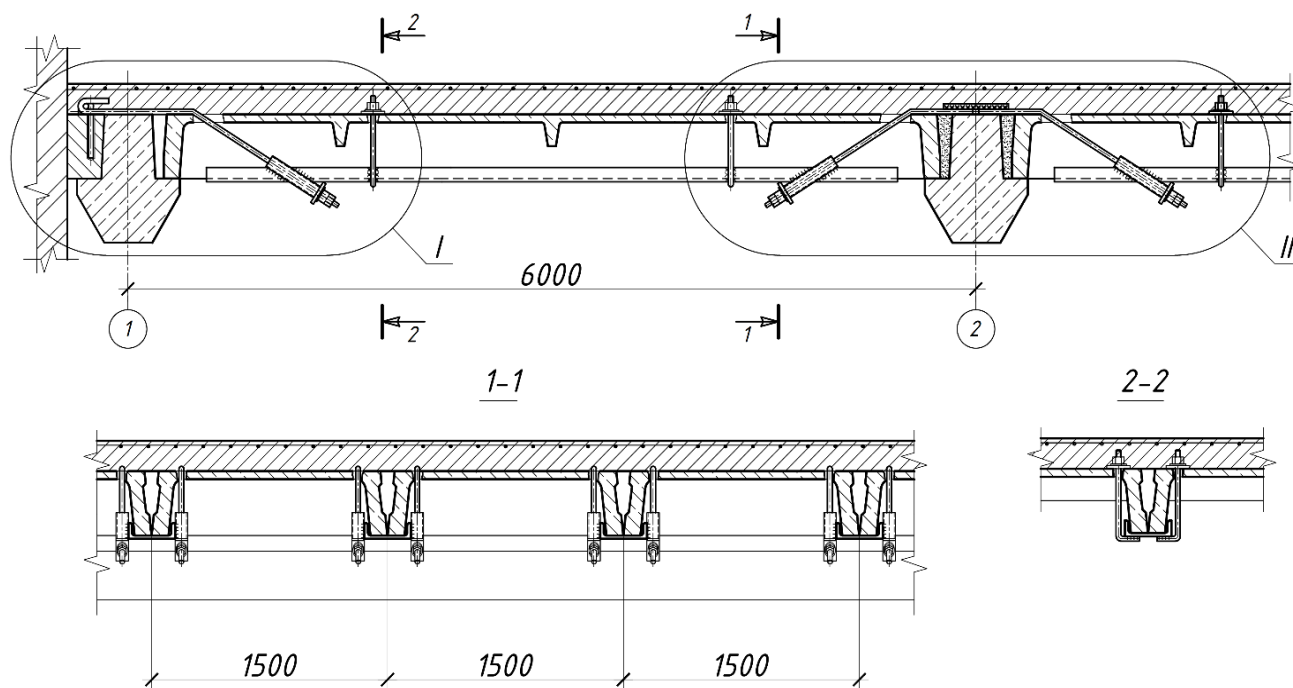


Рис. 4.5 Загальний вигляд конструктивного рішення підсилення збірних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної зтяжки: вузли I і II приведені відповідно на рис. 4.6 і рис. 4.7

Конструктивні елементи шпренгельної зтяжки запроектовані із наступних компонентів: переріз горизонтального елемента зтяжки приймаємо із прокатного швелера №33 ($A_a = 46,5 \text{ см}^2$) або складеного перерізу із двох кутиків $\angle 90 \times 90 \times 7$ мм і прокатної полоси перерізом $t \times b = 12 \times 200$ мм ($\Sigma A_a = 48,6 \text{ см}^2$), які з'єднуємо між собою по довжині у С-подібний профіль (див. рис. 4.6 і рис. 4.7); похилі елементи зтяжки приймаємо із одного стержня перерізом із прокату круглого діаметром $\varnothing 56$ мм ($A = 24,63 \text{ см}^2$) під метричну різьбу М56 (внутрішній діаметр $\varnothing 50,05$ мм, $A = 19,64 \text{ см}^2$) (див. рис. 4.6 і рис. 4.7) або двох стержнів діаметром $2\varnothing 42$ мм ($\Sigma A = 27,7 \text{ см}^2$) під метричну різьбу М42 (внутрішній діаметр $\varnothing 37,13$ мм, $\Sigma A = 10,8 \times 2 = 21,9 \text{ см}^2$).

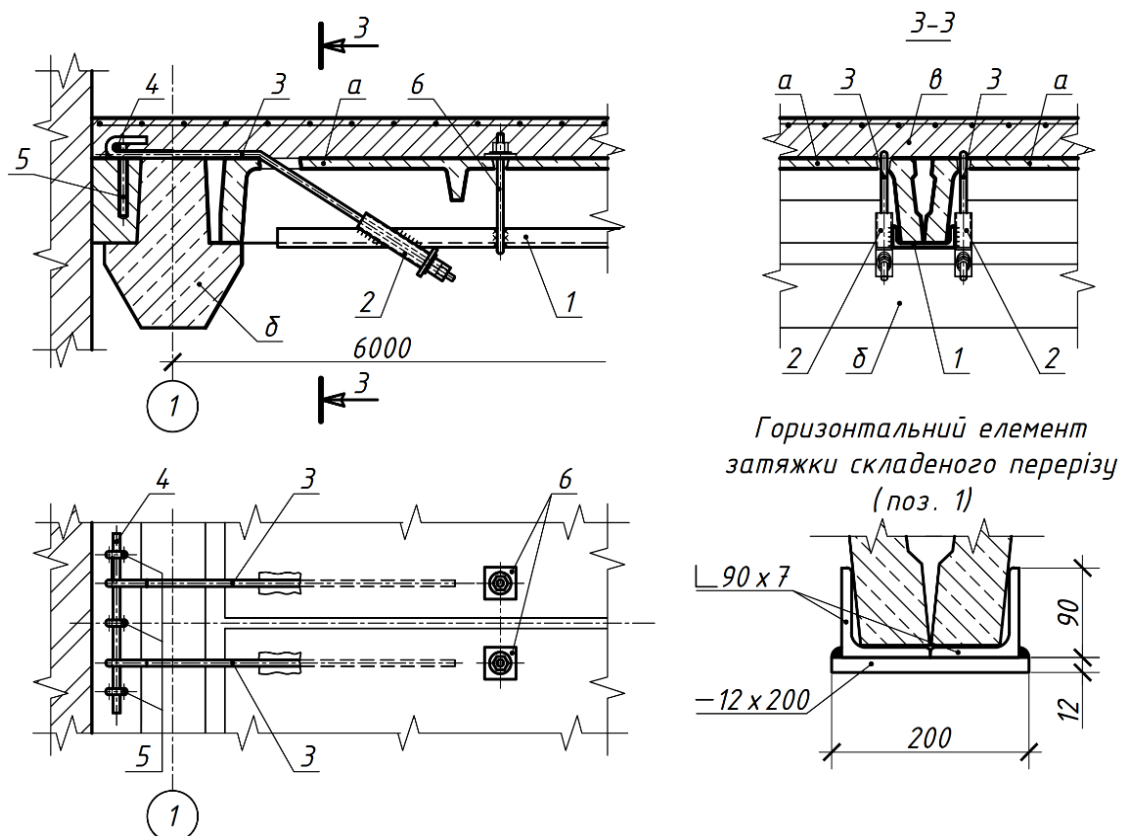


Рис. 4.6 Конструктивне рішення підсилення ребристих плит перекриття поблизу крайньої опори плит на збірні залізобетонні ригелі таврового перерізу: 1 – горизонтальний елемент зтяжки (швелер №33 або складеного перерізу); 2 – вузол кріплення похилого елемента до горизонтального елемента зтяжки (труба 80x80x7 мм; полоса – 12x100x100 мм); 3 – похилий елемент зтяжки (стержень Ø56 мм); 4 – горизонтальний елемент кріплення похилих елементів зтяжки до анкерних елементів (стержень Ø32 мм); 5 – анкерний елемент кріплення зтяжки на крайній опорі перекриття; 6 – вертикальний Г-подібний елемент кріплення горизонтального елемента зтяжки (стержень Ø20 мм); а – існуюча ребриста плита перекриття; б – ригель; в – монолітний залізобетонний шар набетонування, що влаштовується зверху плити для її підсилення.

Для закріплення до верхньої полиці збірних плит горизонтального елемента зтяжки і фіксації його в проектному положенні додаткового встановлюються вертикальні елементи, які улаштовують із прокату гарячекатаного круглого діаметром Ø20 мм під метричну різьбу М20 (див. рис. 4.6 і рис. 4.7).

Армування верхньої зони додаткового залізобетонного шару набетонування здійснюємо арматурною сіткою із стержнів діаметром Ø5 мм, класу Вр-I, які встановлюємо у поперечному напрямку плити з кроком $s=200$ мм на 1 м.п (5Ø5 мм, сумарна площа перерізу на 1 м.п - $\Sigma A = 0,982 \text{ см}^2$) та в поздовжньому

напрямку плити – з кроком $s=175$ мм ($9\varnothing 5$ мм на ширині плити $B=1$ м, сумарна площа перерізу $\Sigma A=1,7$ см²). Армування нижньої зони додаткового залізобетонного шару набетонування здійснюємо конструктивно арматурною сіткою із стержнів діаметром $\varnothing 3$ мм, класу Вр-I, які встановлюємо у поперечному і поздовжньому напрямках плити з кроком $s=200$ мм.

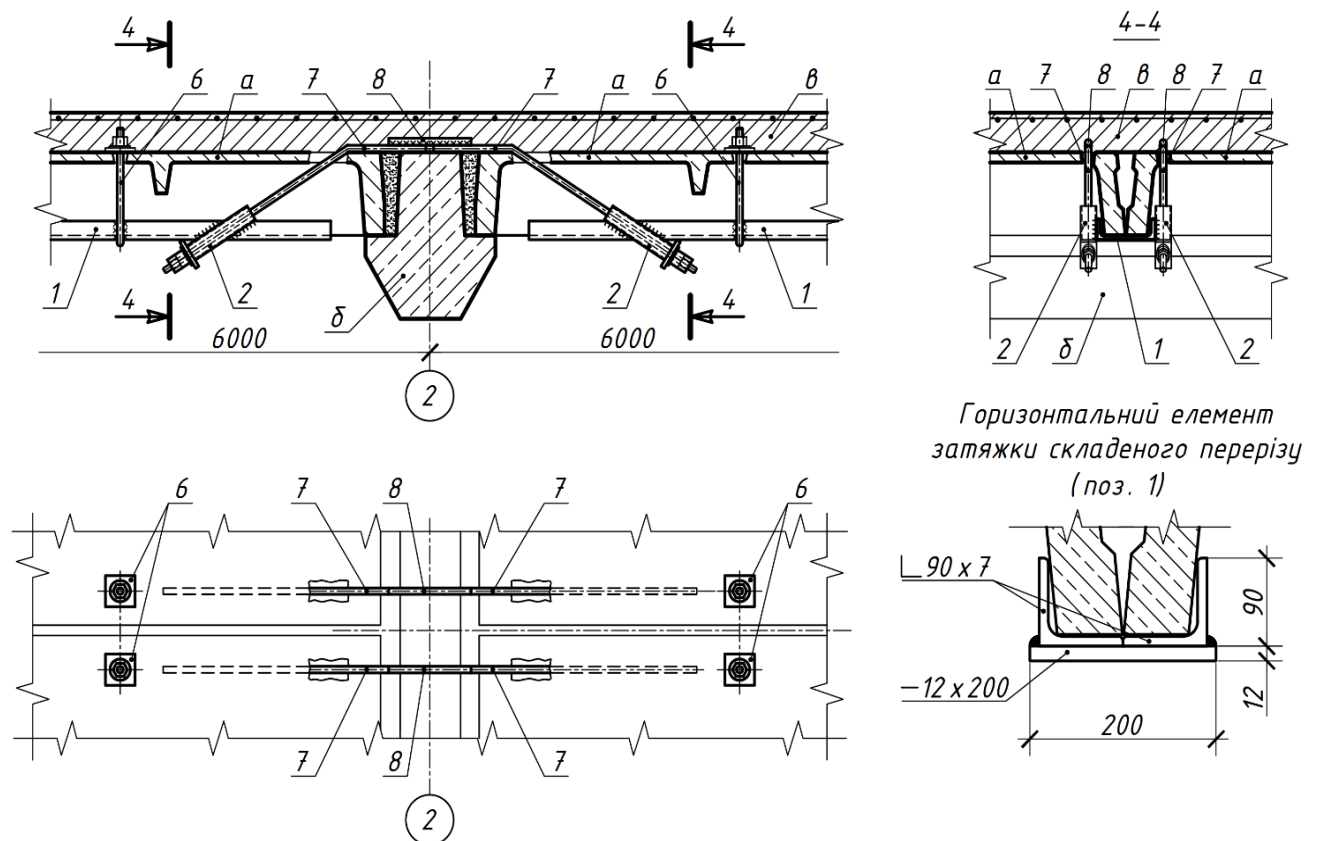


Рис. 4.7 Конструктивне рішення підсилення ребристих плит перекриття на проміжній опорі: 1 – горизонтальний елемент зтяжки; 2 – вузол кріплення похилого елемента до горизонтального елемента зтяжки; 6 – вертикальний Г-подібний елемент кріплення горизонтального елемента зтяжки (стержень $\varnothing 20$ мм); 7 – похилий елемент зтяжки (стержень $\varnothing 56$ мм); 8 – елемент з'єднання похилих елементів зтяжки (стержень $\varnothing 56$ мм); а – існуюча ребриста плита перекриття; б – ригель; в – монолітний залізобетонний шар набетонування, що влаштовується зверху плити для її підсилення.

Несуча здатність комбінованого перерізу збірної плити перекриття, яка підсилена шляхом нарощування перерізу, становить при перевірці умов (4.13) і (4.22): на згин - $M=436,98$ кНм, що більше на 13,7% від $M_{\max} = 384,24$ кН ; на зріз - $V=720,24$ кН, що більше в 2,6 рази від $V_{\max} = 276,93$ кН .

4.2 Розрахунки міцності на згин комбінованих згинальних залізобетонних елементів, які утворюються в результаті підсилення перерізів існуючої залізобетонних конструктивних елементів шляхом нарощування додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням.

4.2.1 Приклад 1. Визначення необхідної площу поперечного перерізу поздовжньої робочої арматури в комбінованій балці.

Дано: комбінована залізобетонна балка, яка має постійний переріз по довжині розміром $b \times h = 400 \times 400 \text{ mm}$ ($d = 35 \text{ cm}$), який складається із трьох вертикальних шарів (дивись рис. 4.8). Середнім шаром комбінованої балки є переріз шириною $b_1 = 150 \text{ mm}$ існуючої залізобетонної балки, що підсилюється, яка виготовлена із бетону класу C12/15 (розрахунковий опір бетону на стиск $f_{c1} = 8,5 \text{ MPa}$). Додаткові бічні залізобетонні шари (набетонування), якими здійснюється симетрично підсилення перерізу існуючої залізобетонної балки, улаштовані із бетону класу C20/25 ($f_{c2} = 14,5 \text{ MPa}$), шириною $b_2/2 = 125 \text{ mm}$. Сумарна ширина додаткового набетонування перерізу комбінованої балки становить $b_2 = 250 \text{ mm}$. На перерізи комбінованої балки, які працюють на згин, діє згинаючий момент, максимальна величина якого становить $M_u = 100 \text{ kN} \times \text{m}$.

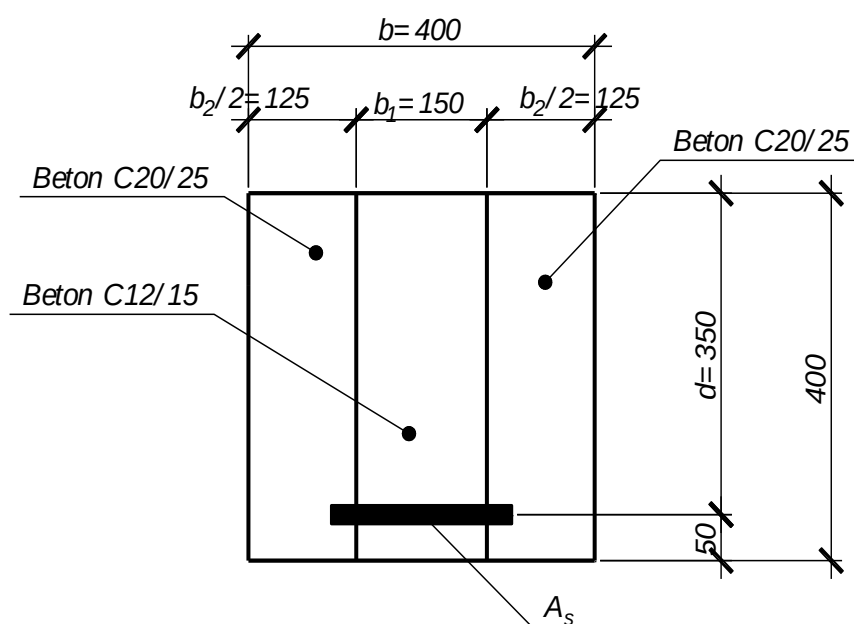


Рис. 4.8 Переріз комбінованої залізобетонної балки

Необхідно визначити величину сумарної площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні перерізів комбінованої залізобетонної балки, які працюють на згин.

Розв'язок.

1) Визначаємо необхідні параметри:

$$k_{z1} = \frac{6M_u}{bd^2 f_{c1}} = \frac{6 \times 100 \times 10^6}{400 \times 350^2 \times 8,5} = 1,441;$$

$$k_{z2} = \frac{6M_u}{bd^2 f_{c2}} = \frac{6 \times 100 \times 10^6}{400 \times 360^2 \times 14,5} = 0,844.$$

2) Встановлюємо механічні коефіцієнти армування:

$$\omega_1 = (k_{z1} - \alpha_1) / \beta_1 = (1,441 - 0,241) / 4,231 = 0,284;$$

$$\omega_2 = (k_{z2} - \alpha_2) / \beta_2 = (0,844 - 0,096) / 4,874 = 0,153.$$

3) Визначаємо необхідну площу армування кожного із компонентів комбінованої балки, який працює на згин:

$$A_{s1} = \frac{f_{c1}}{f_{yd}} \omega_1 b_1 d = \frac{8,5}{415} 0,284 \times 150 \times 350 = 305,4 \text{ mm}^2;$$

$$A_{s2} = \frac{f_{c2}}{f_{yd}} \omega_2 b_2 d = \frac{14,5}{415} 0,153 \times 250 \times 350 = 467,8 \text{ mm}^2.$$

4) Сумарна величина необхідної площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні поперечного перерізу комбінованого елемента дорівнює:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 305,4 + 467,8 = 773,2 \text{ mm}^2.$$

Для армування перерізів комбінованої залізобетонної балки, які працюють на згин, приймаємо арматурні стержні $4\varnothing 16 \text{ mm}$, класу А500 (розрахунковий опір арматурної сталі на розтяг і стиск становить $f_{yd}=415 \text{ МПа}$), сумарна площа поперечного перерізу стержнів становить $\sum A_{sl}=804 \text{ mm}^2$.

4.2.2 Приклад 2. Визначення міцності на згин в розрахункових поперечних перерізах комбінованої балки.

Дано: комбінована залізобетонна балка, яка має постійний переріз по довжині розміром $b \times h = 400 \times 400 \text{ mm}$ ($d=35 \text{ cm}$), який складається із трьох

вертикальних шарів (дивись рис. 4.8). Середнім шаром комбінованої балки є переріз шириною $b_1=150$ mm існуючої залізобетонної балки, що підсилюється, яка виготовлена із бетону класу C12/15 (розрахунковий опір бетону на стиск $f_{c1}=8,5$ МПа). Додаткові бічні залізобетонні шари (набетонування), якими здійснюється симетрично підсилення перерізу існуючої залізобетонної балки, улаштовані із бетону класу C20/25 ($f_{c2}=14,5$ МПа), шириною $b_2/2=125$ mm. Сумарна ширина додаткового набетонування перерізу комбінованої балки становить $b_2=250$ mm. Поздовжнє армування робочою арматурою в розтягувальній зоні комбінованої балки улаштоване із арматурних стержнів $4\varnothing 16$ mm, класу A500 ($f_{yd}=415$ МПа), сумарна площа перерізів стержнів становить $\sum A_s=804$ mm² (див. рис. 4.8). На перерізи комбінованої балки, які працюють на згин, діє згинаючий момент, максимальна величина якого становить $M=100$ кН×м.

Необхідно виконати перевірку міцності на згин перерізів комбінованої залізобетонної балки, яка утворилася в результаті підсилення перерізів існуючої залізобетонної балки шляхом нарощування додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням.

Розв'язок.

1) Визначаємо площу поздовжнього армування в розтягувальній зоні додаткових шарів підсилення (A_{s1}), для цього попередньо визначаємо допоміжні параметри:

$$f_1 = \frac{A_s f_{yd}}{b_1 d} = \frac{804 \times 415}{150 \times 350} = 6,36 \text{ МПа};$$

$$f_2 = \frac{A_s f_{yd}}{b_2 d} = \frac{804 \times 415}{250 \times 350} = 3,81 \text{ МПа}.$$

Апроксимаційні параметри приймаються попередньо і далі виконуємо їх уточнення. У даному випадку ми зразу приймемо уточнені коефіцієнти (з прикладу 1)

$$\alpha_1 = 0,241, \beta_1 = 4,231; \alpha_2 = 0,096, \beta_2 = 4,874.$$

$$A_{s1} = A_s \frac{\beta_2 f_2 + \alpha_2 f_{c2} - \alpha_1 f_{c1}}{\beta_1 f_1 + \beta_2 f_2} = 804 \times \frac{4,874 \times 3,81 + 0,096 \times 14,5 - 0,241 \times 8,5}{4,231 \times 6,36 + 4,874 \times 3,81} =$$

$$= 804 \times 0,394 = 316,68 \text{ mm}^2.$$

2) Встановлюємо коефіцієнти механічного армування за виразами:

$$\omega_1 = \frac{f_{yd} A_{s1}}{f_{c1} b_1 d} = \frac{415 \times 316,68}{8,5 \times 150 \times 350} = 0,295;$$

$$\omega_2 = \frac{f_{yd} (A_s - A_{s1})}{f_{c2} b_2 d} = \frac{415 \times (804 - 316,68)}{14,5 \times 250 \times 350} = 0,159.$$

3) Визначаємо величини допоміжних параметрів α_1 , α_2 , β_1 , β_2 згідно даних таблиці 2.2 та перевіряємо правильність їх прийняття.

4) Визначаємо допоміжний параметр:

$$k_{z1} = \alpha_1 + \beta_1 \omega_1 = 0,241 + 4,231 \times 0,295 = 1,49.$$

5) Виконуємо перевірку міцності на згин перерізів комбінованого згинального елемента за виразом:

$$M_u = f_{c1} k_{z1} \frac{b d^2}{6} = 8,5 \times 1,49 \times \frac{400 \times 350^2}{6} \times 10^{-6} = 103,4 \text{ кН} \times \text{м}, \text{ що більше від величини}$$

згинального моменту $M=100 \text{ кН} \times \text{м}$, який діє в прогоні комбінованої балки. Умова міцності на згин комбінованої балки задовольняється.

4.3 Розрахунок міцності на згин і проектування конструктивних елементів підсилення залізобетонних балкових елементів монолітного перекриття шляхом збільшення їх поперечного перерізу в стиснутій та розтягнутій зонах.

4.3.1 Послідовність розрахунку міцності на згин та проектування конструктивних компонентів (елементів) підсилення залізобетонних балкових елементів монолітного перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки

Розрахунок і проектування конструктивних компонентів (елементів) підсилення балкових і плитних елементів монолітного залізобетонного перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки виконуємо в такій послідовності:

- визначення величин розрахункових навантажень для заданої конструктивної схеми монолітного залізобетонного балково-плитного перекриття будівлі, загальний вигляд та креслення якої приведено відповідно на рис. 4.9 і рис. 4.10;



Рис. 4.9 Загальний вигляд балково-плитного монолітного залізобетонного перекриття будівлі, що підсилюється

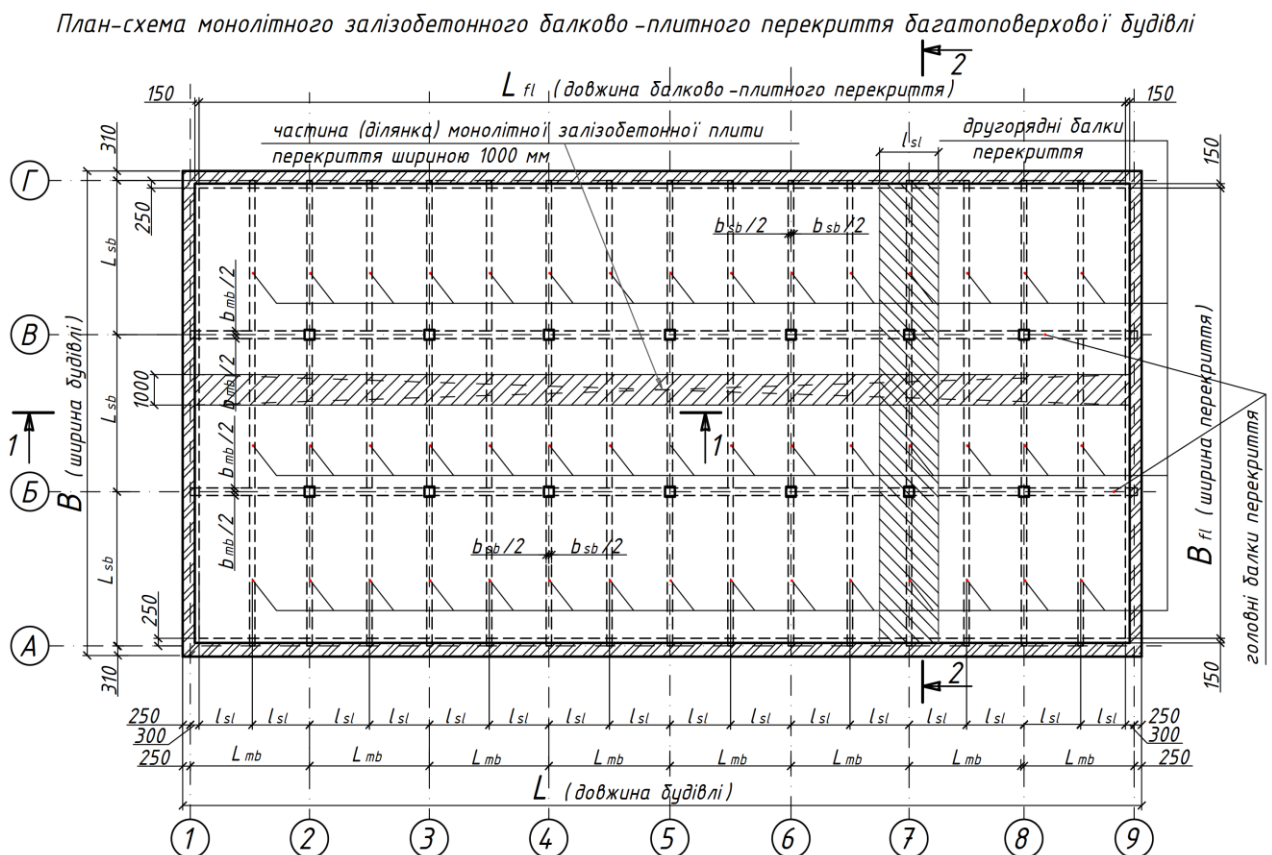


Рис. 4.10 Конструктивна схема балково-плитного монолітного залізобетонного перекриття будівлі, що підсилюється

- прийняття узагальненої розрахункової схеми (див. рис. 4.11 і рис. 4.12) та формування приведеного комбінованого розрахункового перерізу напружено-деформованого стану балкових і плитних елементів перекриття (див. рис. 4.13), які підсилюються, при забезпеченні умов міцності на згин; визначення величин внутрішніх зусиль в розрахункових комбінованих перерізах балкових елементів і плитних ділянок монолітного залізобетонного перекриття, що підсилюються;

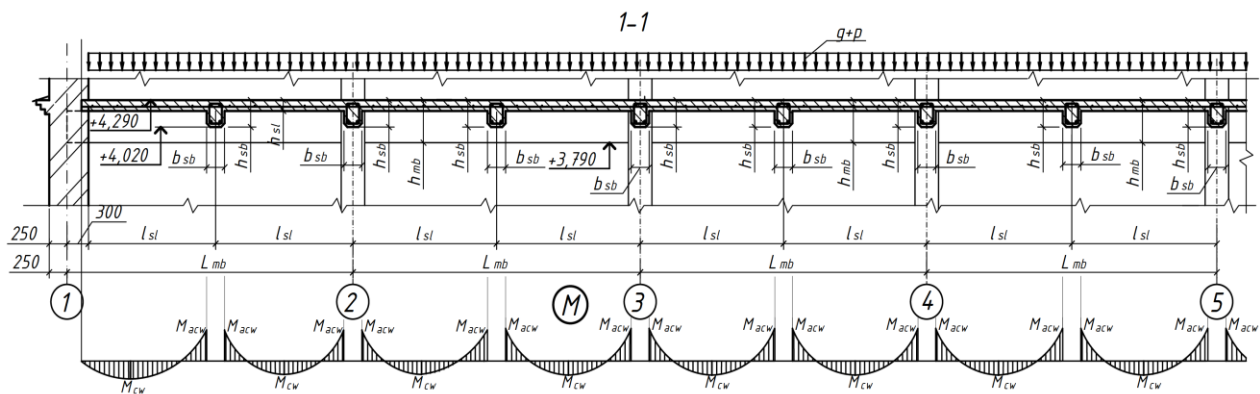


Рис. 4.11 Розрахункова схема плитних ділянок монолітного залізобетонного перекриття для розрахунку конструктивних елементів їх підсилення

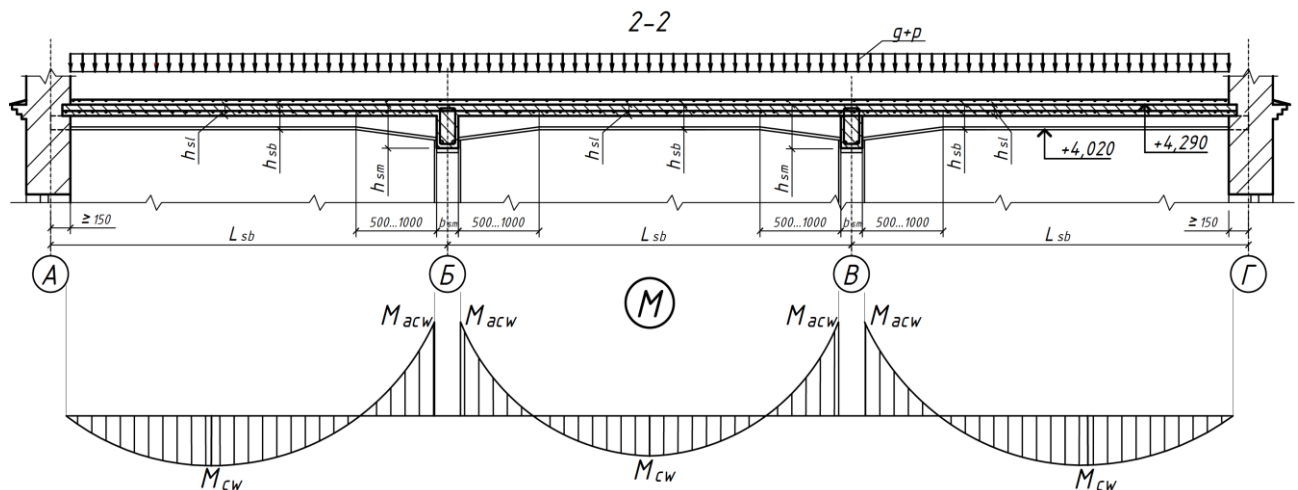


Рис. 4.12 Розрахункова схема другорядних балкових елементів монолітного залізобетонного перекриття для розрахунку конструктивних елементів їх підсилення

- визначення товщини (d) додаткового залізобетонного шару набетонування плитних ділянок перекриття при забезпеченні умов міцності на згин в їх розрахункових перерізах;
- визначення площі перерізів додаткового армування горизонтального і похилого елементів шпренгельної затяжки при визначеній товщині (d) додаткового залізобетонного шару набетонування для підсилення балкових елементів перекриття при забезпеченні умов міцності на згин в їх розрахункових перерізах;

Конструктивні рішення з підсилення плити та другорядної балки монолітного залізобетонного перекриття шляхом збільшення поперечного перерізу додатковим шаром залізобетону в стиснутій зоні та армування в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельного затягування

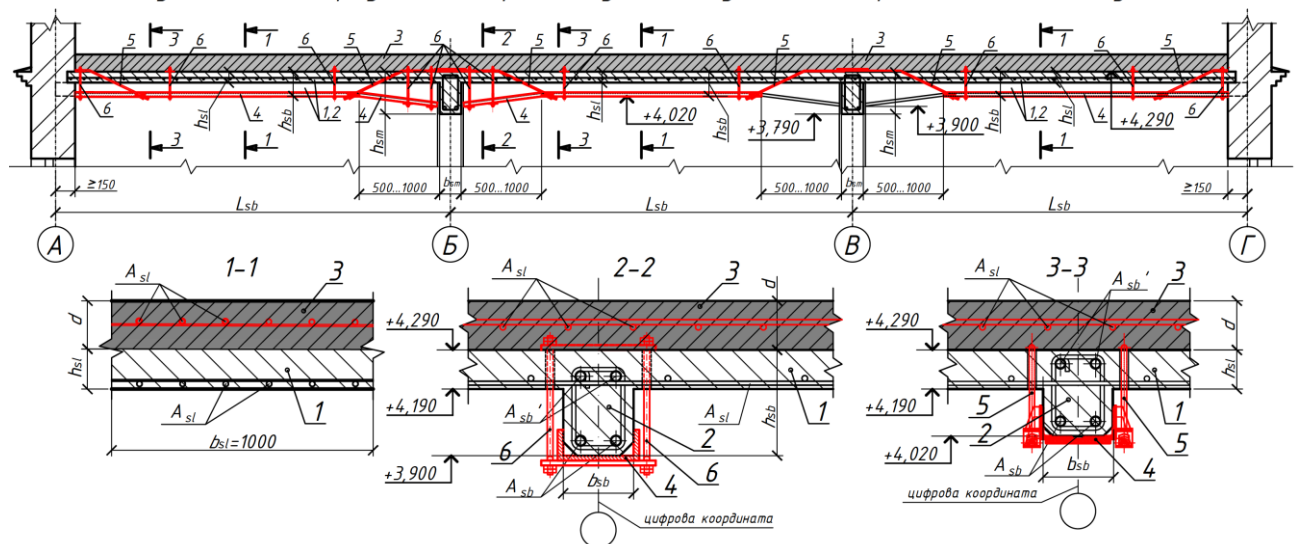


Рис. 4.13 Загальний вигляд конструктивного рішення посилення плити та другорядної балки монолітного залізобетонного перекриття шляхом збільшення поперечного перерізу додатковими залізобетонними шарів у стиснутій зоні та армування в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельного затягування: 1 – плита перекриття; 2 – другорядна балка перекриття; 3 – монолітний залізобетонний додатковий шар збільшення поперечних перерізів елементів перекриття; 4 – горизонтальний елемент шпренгельного затягування; 5 – похилий елемент шпренгельного затягування; 6 – вертикальний елемент шпренгельного затягування

- визначення зусилля зсуву між верхньою площиною монолітного залізобетонного перекриття і нижньою площиною додаткового залізобетонного шару набетонування залежно від випадку напружено-деформованого стану в розрахункових перерізах балкового елемента, які працюють на згин;

- визначення площі перерізів елементів армування шару набетонування плитних ділянок залізобетонного перекриття в розрахункових перерізах поблизу граней його балкових елементів, які сприймають зусилля згинального моменту від’ємного значення в порівнянні до згинального моменту, що діє в прогоні плитної ділянки;
- перевірка дотриманні вимог міцності на зріз в розрахункових перерізах балкових елементів монолітного залізобетонного перекриття, що підсилені, та визначення площі перерізів елементів додаткового їх армування у разі недостатньої їх несучої здатності;
- конструювання компонентів (елементів) підсилення плитних і балкових елементів монолітного залізобетонного перекриття.

4.3.2 Визначення максимальної величини товщини ($d_{\max}$) додаткового залізобетонного шару набетонування плитних ділянок перекриття при забезпеченні умов міцності на згин в їх розрахункових перерізах на середині їх прогону (див. рис. 4.14).

Товщину ($d_{\max}$) додаткового залізобетонного шару набетонування плитних ділянок перекриття визначаємо за залежністю (4.28) при дотриманні забезпечення умов міцності на згин у їх прогоні (при дії позитивного моменту M_{cw}):

$$d_{\max} = \frac{M_{cw}}{f_s A_{s,sl}} - 0,5x_{sl} - h_0, \quad (4.28)$$

де M_{cw} – позитивний згинальний момент, який діє на середині прогону плитного елемента монолітного залізобетонного перекриття;

f_s – розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури, якою армована нижня розтягнута зона плитного елемента існуючого монолітного перекриття;

$A_{s,sl}$ – площа перерізу поздовжньої арматури, якою армована нижня розтягнута зона плитного елемента монолітного перекриття шириною $b_{sl}=1$ м;

h_0 – робоча висота поперечних перерізів плитного елемента перекриття на середині його прогону, яка визначається за залежністю (4.29):

$$h_0 = h_{sl} - a_s; \quad (4.29)$$

x_{sl} – висота стисненої зони поперечного перерізу плитного елемента перекриття на середині його прогону, яка визначається за залежністю (4.30):

$$x_{sl} = \frac{f_s \times A_{s,sl}}{f_{cd} \times b_{sl}}, \quad (4.30)$$

де f_{cd} - розрахунковий опір на стиск бетону додаткового залізобетонного шару набетонування плитних ділянок перекриття товщиною d , яким виконується підсилення поперечного їх перерізу;

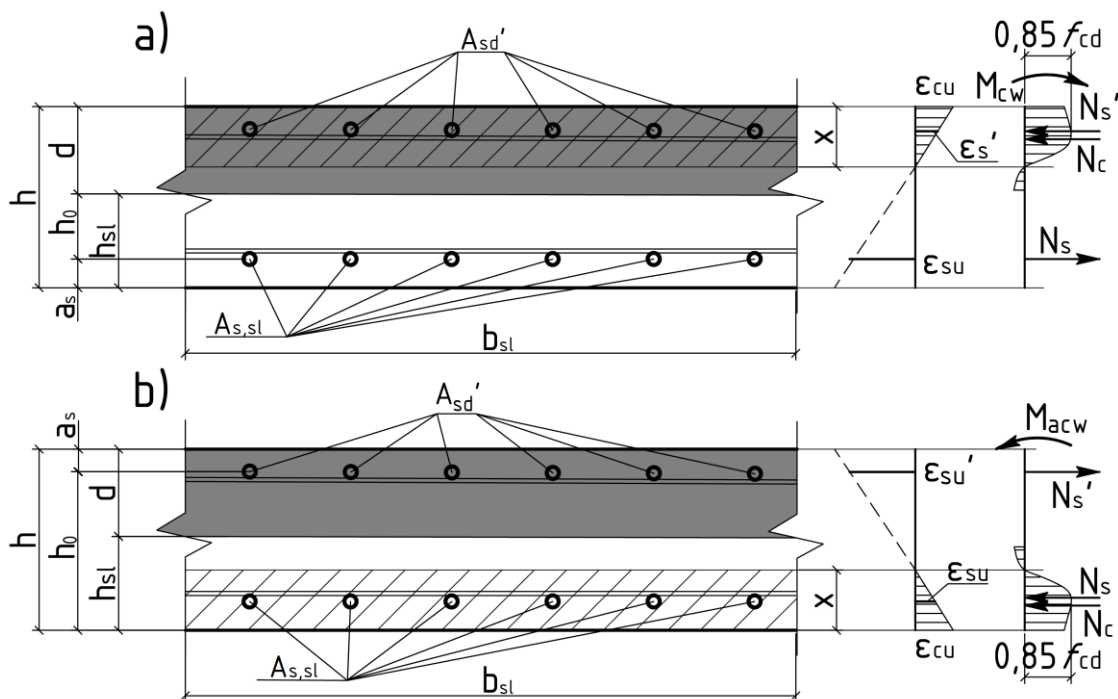


Рис. 4.14 Випадки напружено-деформованого стану приведенного комбінованого перерізу плитного елемента монолітного залізобетонного перекриття, який підсилюється шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні: а) при дії позитивного згинального моменту (M_{cw}) в прогоні плитної ділянки; б) при дії від'ємного згинального моменту (M_{acw}) поблизу обпирання плитної ділянки на другорядну балку перекриття

Необхідну величину армування (A_{sd}') додаткового залізобетонного шару набетонування плитних ділянок перекриття визначеної ширини (b_{sl}) розраховуємо за залежністю (4.31) при дотриманні забезпечення умов міцності на згин поблизу опорних їх ділянок (при дії від'ємного моменту M_{acw}):

$$A_{sd}' = \frac{M_{acw}}{0,8 \times f_{sd} \times (h_{sl} + d)}, \quad (4.31)$$

де M_{acw} – від’ємний згинальний момент, який діє поблизу опорних ділянок плитного елементу монолітного залізобетонного перекриття;

f_{sd} - розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури, якою буде здійснюватися армування додаткового шару набетонування товщиною d комбінованого перерізу плитного елементу монолітного залізобетонного перекриття.

4.3.3 Визначення площі перерізу армування горизонтального елементу шпренгельної затяжки при визначеній (заданій) товщині (d) додаткового залізобетонного шару набетонування плитних ділянок балкового елементу перекриття, що підсилюється, при забезпеченні умов їх міцності на згин в їх розрахункових перерізах на середині їх прогону (див. рисунок 4.13).

Умова рівноваги при забезпеченні умов міцності на згин в розрахункових перерізах (див. рис. 4.15) балкового елементу монолітного перекриття, який підсилений одночасно нарощуванням стиснутої і розтягнутої зон їх перерізів, відносно рівнодіючої осі стисненої зони бетону буде мати вигляд:

$$M = f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_{sd} \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f_s' A_s' \times (0,5x - a_s), \quad (4.32)$$

де M – максимальне значення згинального моменту від дії зовнішніх навантажень в розрахункових перерізах в зоні згину в прогоні балкового елементу;

d - товщина додаткового залізобетонного шару набетонування при підсиленні збірних ребристих плит шляхом нарощування їх перерізів;

h_0 – робоча висота перерізу балкового елементу перекриття, що підсилюється;

f_s – розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, якою армована нижня розтягнута зона балкового елементу монолітного перекриття;

f_s' – розрахунковий опір на стиск поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, якою армована верхня стиснута зона додаткового залізобетонного шару набетонування, яким

здійснюється підсилення перерізів балкового елемента монолітного перекриття;

f_{sd} – розрахунковий опір на розтяг горизонтального елемента шпренгельної затяжки відповідно норм ДБН В.2.6-198:2014 [162];

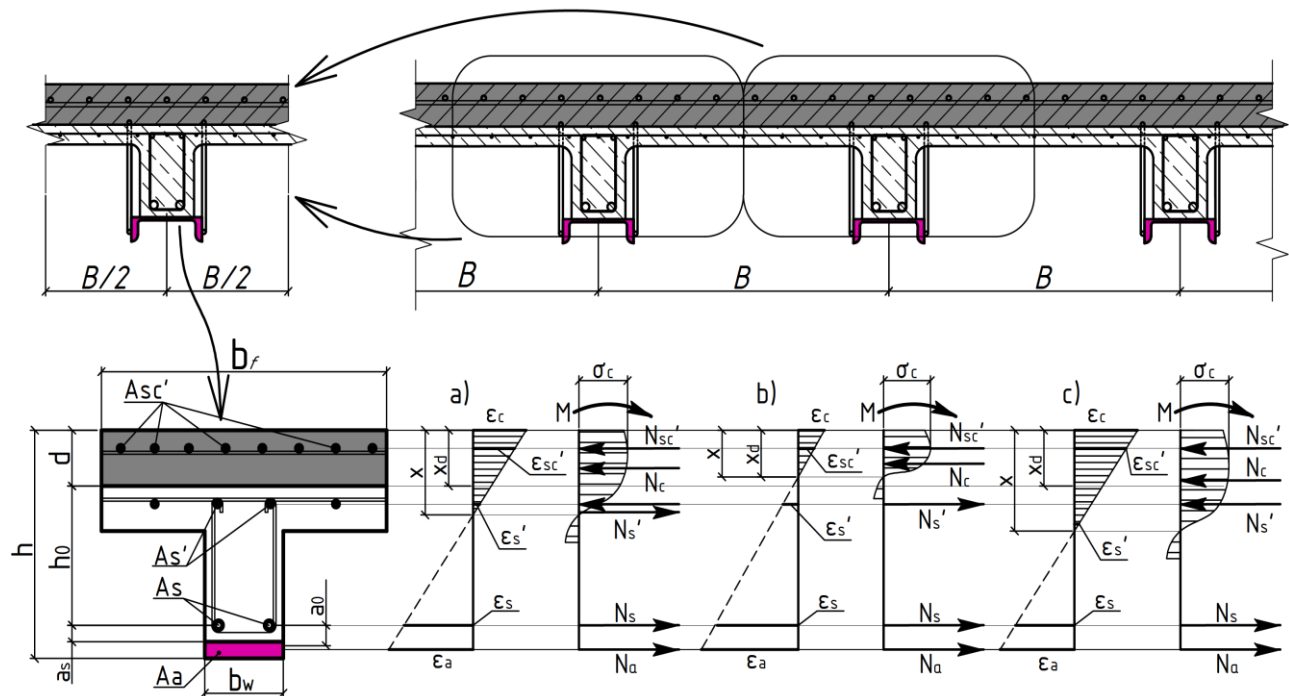


Рис. 4.15 Випадки напружено-деформованого стану в комбінованому тавровому перерізі балкового елемента монолітного залізобетонного перекриття, що підсилюється шляхом збільшення перерізу додатковим шаром залізобетону в стиснутій зоні та армуванням у розтягнутій зоні у вигляді шпренгельного стягування: а) нейтральна вісь проходить через монолітну плиту перекриття; б) нейтральна вісь проходить через поперечний переріз додатковим шаром залізобетону підсилення; в) нейтральна вісь у ребрі комбінованого таврового перерізу балкового елемента перекриття

a_0 – відстань між геометричними горизонтальними осями існуючої поздовжньої арматури і горизонтальним елементом шпренгельної затяжки (A_{sd}), яка приймається в рівнянні зі знаком «+» при $h_0 + a_0 \geq h_0$ та зі знаком «-» при $h_0 - a_0 < h_0$;

A_s – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, які встановлені в розтягнутій зоні перерізу балкового елементу монолітного перекриття, що підсилюється;

A_{sd} – сумарна площа перерізу поздовжніх горизонтальних елементів шпренгельної затяжки (A_a), якими додатково здійснюється армування балкового елементу перекриття, що підсилюється в розтягнутій зоні перерізу;

A'_s – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, котрими здійснюється армування додаткового залізобетонного шару набетонування в стиснутій зоні перерізу балкового елементу монолітного перекриття, що підсилюється;

x – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому комбінованому перерізі на ділянці плити, що сприймає навантаження від згинального моменту (M), яка визначається за залежністю:

$$x = (f_s A_s + f_{sd} A_{sd} + f'_s A'_s) / (f_{cl} b), \quad (4.33)$$

де f_{cl} – розрахунковий опір на стиск важкого бетону відповідно п.3.1 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від його класу, із якого буде виготовлений (улаштований) додатковий залізобетонний шар набетонування при підсиленні балкового елементу монолітного перекриття;

b_f – розрахункова ширина комбінованого таврового приведенного перерізу балкового елементу монолітного залізобетонного перекриття.

В умові рівноваги (4.32) невідомими є величини d, A_{sd}, x, A'_s , що ускладнює розрахунок оптимальних (ефективних) їх параметрів при визначених (заданих, прийнятих) величинах зовнішнього навантаження і міцносних характеристиках матеріалів плити і компонентів підсилення. Із рівняння рівноваги (4.32) при $A'_s = 0$ і прийнятті товщини додаткового залізобетонного шару набетонування (d) визначаємо необхідну величину площі поперечного перерізу поздовжнього елементу шпренгельної затяжки (A_{sd}) із залежності (4.34):

$$A_{sd} = \frac{f_c b}{f_{sd}} \times (-2M + f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x_n) - (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x_n) \times (1 \pm d \pm a_0 - 0,5x_n)); \quad (4.34)$$

де x_H – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому комбінованому перерізі на ділянці плити, що сприймає навантаження від згинального моменту (M), при армуванні його тільки існуючими арматурними стержнями в розтягнутій зоні плити загальною площею A_s , яка визначається за залежністю (4.35):

$$x_H = (f_s A_s) / (f_c b). \quad (4.35)$$

Розрахунок величини A_{sd} за залежністю (4.34) завжди буде оптимальний (ефективний з економічної точки зору), тому що в окремих випадках при нарощуванні перерізу шляхом набетонування встановлення додаткового армування в розтягнутій зоні перерізу може бути непотрібне, бо буде достатньо вже існуючої в ній площі армування (A_s). Тому для удосконалення методики розрахунку компонентів підсилення був запропонований додатковий коефіцієнт (n), який буде враховувати відношення площ армування A_{sd} до A_s .

$$n = A_{sd} / A_s. \quad (4.36)$$

Величину коефіцієнта n визначаємо за залежностями (4.37)-(4.39):

$$0,5x_H \cdot n^2 + (h_0 + d \pm a_0 + x_H) \cdot n + (h_0 + d + 0,5x_H - \frac{M}{f_s A_s}) = 0; \quad (4.37)$$

$$D = (h_0 + d \pm a_0 + x_H)^2 - 4 \times 0,5x_H \times (h_0 + d + 0,5x_H - \frac{M}{f_s A_s}); \quad (4.38)$$

$$n_{1,2} = \frac{-(h_0 + d \pm a_0 + x_H) \pm \sqrt{D}}{x_H}. \quad (4.39)$$

При $n \leq 0$ підсилення залізобетонної балкового елементу одночасно шляхом нарощування перерізу в стиснутій і розтягнутій зонах непотрібне, буде достатньо виконати підсилення елементу тільки в стисненій його зоні шляхом улаштування додаткового залізобетонного шару набетонування.

При $n > 0$ площа перерізу поздовжнього елементу затяжки буде становити:

$$A_{sd} = (n + 0,1) \times A_s. \quad (4.40)$$

Визначаємо величину необхідної площі армування (A'_s) залізобетонного шару набетонування в комбінованому перерізі плитного чи балкового елементу за умови рівноваги при забезпеченні умов міцності на згин відносно рівнодіючої осі поздовжнього армування в його розтягнутій зоні:

$$A'_s = \frac{M - f_c b x \times (h_0 + d - 0,5x)}{f_s \times (h_0 + d - a')}; \quad (4.41)$$

При величині площі армування верхньої стиснутої зони менше нуля ($A'_s \leq 0$), армування виконуємо конструктивно або приймаємо величину площі армування перерізу згідно коефіцієнта армування шару набетонування плитної ділянки перекриття. При $A'_s > 0$ виконуємо корегування величини площі перерізу поздовжнього елемента зтяжки з урахуванням величин розрахункових опорів на розтяг існуючих арматурних стержнів (f_s) і поздовжнього елемента шпренгельної зтяжки (f_{sd}), що проектується, за залежністю (4.42):

$$A_{sd} = f_s / f_{sd} \times (A_s \times (n + 0,1) + A'_s). \quad (4.42)$$

Виконуємо перевірку несучої здатності перерізу підсиленої плити при забезпеченні умови міцності на згин в розрахункових перерізах поздовжніх ребер збірних плит перекриття, що підсилені, відносно рівнодіючої вісі стисненої зони бетону за залежністю (4.43):

$$M \leq f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_{sd} \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f_s A'_s \times (0,5x - a'_s), \quad (4.43)$$

Визначаємо товщину (d) шару набетонування балкового елемента перекриття із умови міцності на згин за залежністю (4.44) та порівнюємо її величину з товщиною набетонування плитної ділянки перекриття, яка була попередньо визначена за залежністю (4.28):

$$d = \frac{M \pm f_{sd} A_{sd} \cdot a_0}{f_s A_s + f_{sd} A_{sd}} - h_0 - \frac{f_s A_s + f_{sd} A_{sd}}{2 f_c b}, \quad (4.44)$$

4.3.3 Визначення площі перерізу армування похилого елемента шпренгельної зтяжки при визначеній площі її горизонтального елемента.

Площу перерізу похилого елемента ($A_{s,inc}$) шпренгельної зтяжки визначаємо за залежністю з урахуванням кута (α) його нахилу до горизонтальної площини і величин розрахункових опорів на розтяг поздовжнього (f_{sd}) і похилого ($f_{s,inc}$) елементів шпренгельної зтяжки, що проектується:

$$A_{s,inc} = f_{sd} / f_{s,inc} \times A_{sd} / \cos \alpha, \quad (4.45)$$

де $f_{s,inc}$ – розрахунковий опір на розтяг похилої арматури (відгину) $A_{s,inc}$ відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, яка є похилим елементом шпренгельної зтяжки і додатковим

армуванням - ребра збірних плит перекриття, що підсилюються, на приопорних їх ділянках;

α – кут нахилу похилого елемента ($A_{s,inc}$) шпренгельної затяжки відносно горизонтальної площини.

4.3.4 Перевірка міцності на згин в розрахункових перерізах балкового елемента перекриття поблизу його опорних ділянок при дії від'ємного згинального моменту M_{acw} (див. рисунок 4.16).

Виконуємо перевірку міцності на згин в розрахунковому перерізі балкового елемента при дії від'ємного згинального моменту M_{acw} без урахування додаткової площі (A_a) горизонтального елемента шпренгельної затяжки в стисненій зоні комбінованого перерізу (див. розрахункову схему на рис. 4.16,а) за залежністю (4.46):

$$M_{acw} \leq f'_s A'_s \times (h_{sb} - 0,5x_c - a'_s) + f_{sd} A_{sd} \times (h_{sb} + d - a_{sd} - 0,5x_c) + f'_a A'_a (h_{sb} - 0,5x_c) + f_s A_s \times (0,5x_c - a_s), \quad (4.46)$$

де x_c – висота стисненої зони бетону в розрахунковому перерізі, яка визначається за залежністю (4.47):

$$x_c = (f'_s A'_s + f_{sd} A_{sd} + f'_a A'_a) / (f_c \times b_w), \quad (4.47)$$

де A'_a – площа конструктивних похилих елементів шпренгельної затяжки на рівні верхньої грані плити існуючого монолітного залізобетонного перекриття;

f'_a – розрахунковий опір на розтяг горизонтальної ділянки похилого конструктивного елемента шпренгельної затяжки на рівні верхньої грані плити існуючого монолітного залізобетонного перекриття.

При недостатній міцності на згин в розрахунковому перерізі балкового елемента перекриття виконуємо перевірний розрахунок при дії від'ємного згинального моменту M_{acw} з урахування додаткової площі (A_a) горизонтального елемента шпренгельної затяжки в стисненій зоні комбінованого перерізу (див. розрахункову схему на рис. 4.16,б) за залежністю (4.48):

$$M_{acw} \leq f'_s A'_s \times (h_{sb} - 0,5x_c - a'_s) + f_{sd} A_{sd} \times (h_{sb} + d - a_{sd} - 0,5x_c) + f'_a A'_a (h_{sb} - 0,5x_c) + f_s A_s \times (0,5x_c - a_s) + f_a A_a \times 0,5x_c. \quad (4.48)$$

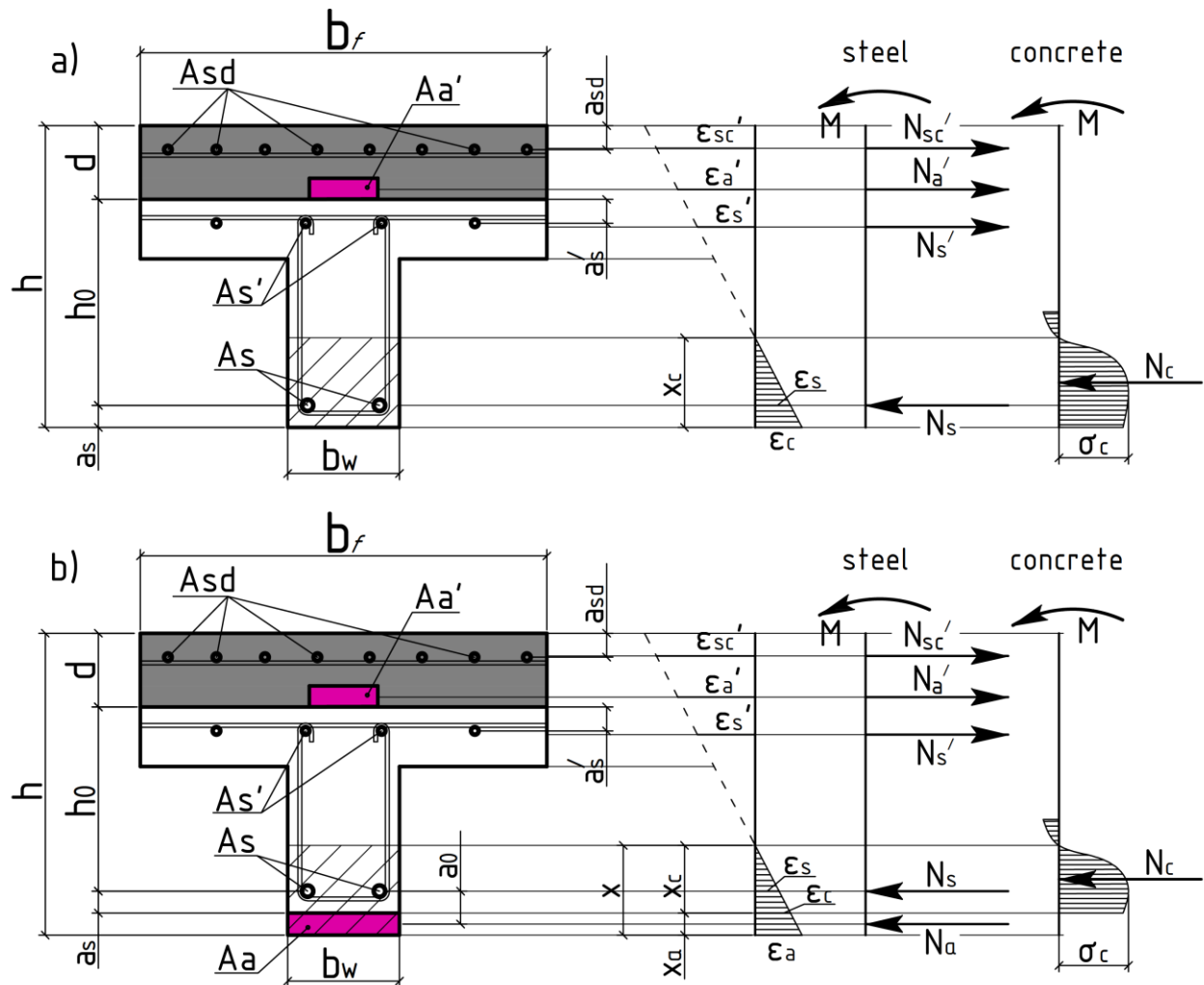


Рис. 4.16 Випадки напружено-деформованого стану в комбінованому тавровому перерізі поблизу опори балкового елемента монолітного залізобетонного перекриття, що підсилюється шляхом збільшення поперечного перерізу додатковим шаром залізобетону в стиснутій зоні та арматурою в розтягнутій зоні у вигляді комбінованого перерізу шпрингельного стягування (під дією негативного моменту): а) комбінований переріз без армування горизонтальним елементом шпрингельної затяжки; б) комбінований переріз з армуванням горизонтальним елементом шпрингельної затяжки

При недостатній міцності на згин в розрахунковому перерізі балкового елемента перекриття поблизу опори при дії від'ємного згинального моменту M_{acw} необхідно виконати додаткове його армування шляхом збільшення додаткової площі армування ($A_{a'}$) горизонтальної ділянки похилого конструктивного елемента шпрингельної затяжки чи площі армування (A_{sd}) шару набетонування товщиною d (дивись розрахункові схеми на рис. 4.16).

4.3.5 Визначення зусилля зсуву (V_{hv}) між верхньою площиною збірної залізобетонної плити перекриття і нижньою площиною додаткового залізобетонного шару набетонування залежно від випадку напружено-деформованого стану (НДС) в її розрахунковому перерізі на згин.

Величина сумарного зусилля зсуву (V_{hv}) буде становити (див. рис. 4.17):

- при від'ємному моменті (див. рис. 4.17,а):

$$V_{hv} = C = f_a A_a + f_s A_s + f_c b_w x_c - \sigma'_s A'_s; \quad (4.49)$$

$$V_{hv} = T = f_a A'_a + f'_{sc} A'_{sc}, \quad (4.50)$$

де $\sigma'_s = \varepsilon'_s E_s$; $\varepsilon'_s = \varepsilon_c x_c / (h_0 + a_s - a'_s - x_c)$.

- при позитивному моменті при $x_c \leq d$ (див. рис. 4.17,б):

$$V_{hv} = C = f_{c1} b_f x_c + f'_{sc} A'_{sc}; \quad (4.51)$$

$$V_{hv} = T = f_a A_a + f_s A_s + \sigma'_s A'_s, \quad (4.52)$$

де $\sigma'_s = \varepsilon'_s E_s$; $\varepsilon'_s = \varepsilon_c x_c / (d + a'_s - x_c)$.

- при позитивному моменті при $d < x_c \leq d + h_f$ (див. рис. 4.17,с):

при $x_c \leq d + a'_s$:

$$V_{hv} = C = b_f [f_{c1} d + f_c (x_c - d)] + f'_{sc} A'_{sc} < f_a A_a + f_s A_s + \sigma'_s A'_s, \quad (4.53)$$

при $x_c > d + a'_s$:

$$V_{hv} = C = b_f [f_{c1} d + f_c (x_c - d)] + f'_{sc} A'_{sc} < f_a A_a + f_s A_s - \sigma'_s A'_s, \quad (4.54)$$

- при позитивному моменті при $x_c > d + h_f$ (див. рис. 4.17,д):

при $x_c > d + a'_s$:

$$V_{hv} = C = f_{c1} b_f d + f_c [b_f (x_c - d) + b_w (x_c - d - h_f)] + f'_{sc} A'_{sc} < f_a A_a + f_s A_s - \sigma'_s A'_s, \quad (4.55)$$

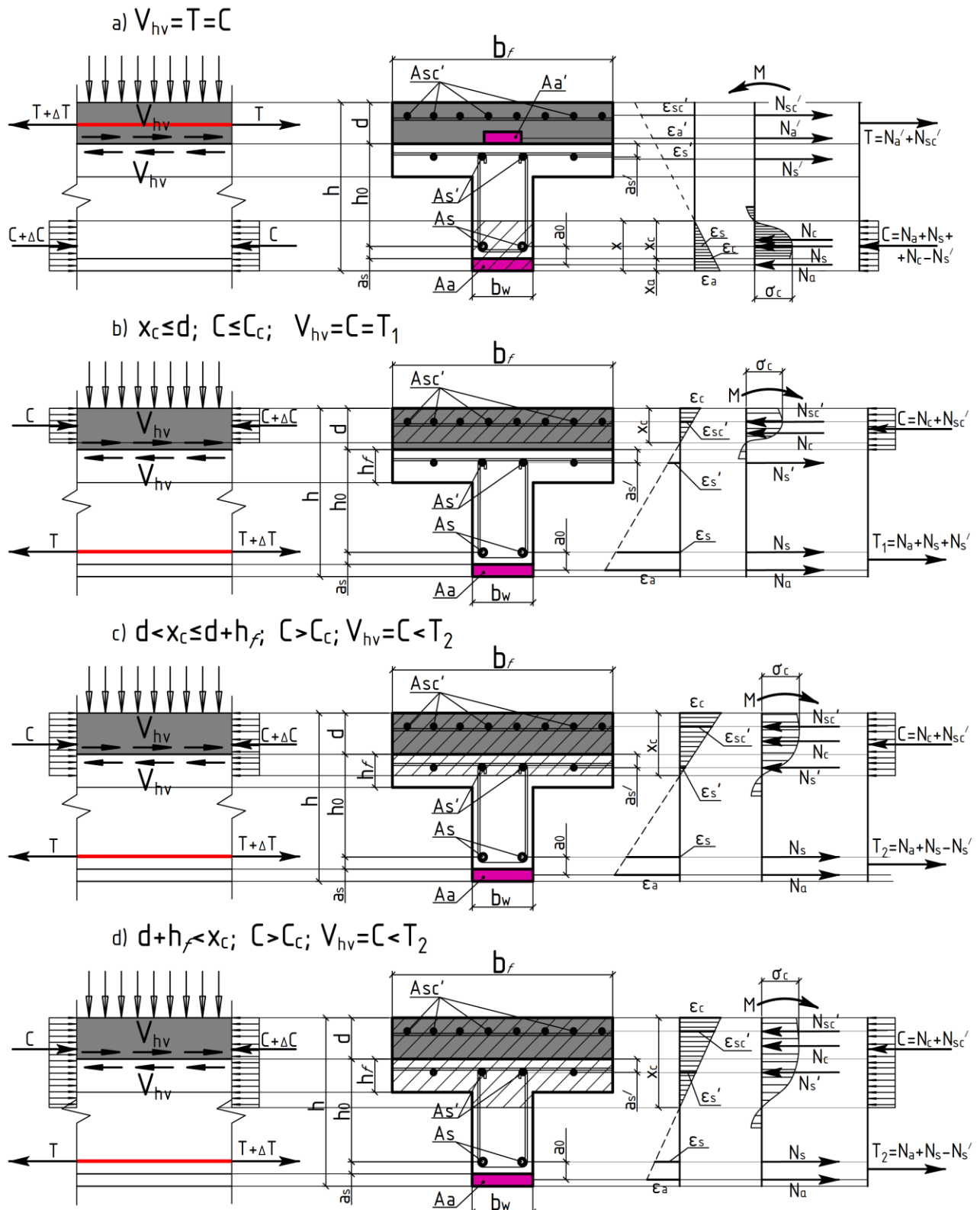


Рис. 4.17 Горизонтальна зсувна сила (V_{hv}) на межі розділу між верхнім додатковим залізобетонним шаром бетонування та верхньою площиною плити Т-подібного поперечного перерізу балки перекриття: а) у перерізі з негативним моментом (M_{op}) поблизу опори; б), в), г) у перерізах з позитивним моментом (M_{pr}) у прольоті елемента залежно від значення стиснутої бетонної зони (x_c)

Сумарне зусилля зсуву, яке виникає на межі стикування різних конструктивних компонентів у збірно-монолітних елементах, повинно бути менше міцності на зсув компонентів з'єднувальних елементів:

$$V_{hv} \leq P_{Rd}, \quad (4.56)$$

де P_{Rd} – несуча здатність на зсув різної конструктивної форми компонента з'єднувального елемента, яка визначається згідно норм ДСТУ Б В.2.6-216:2016 [163].

Якщо умова (4.56) задовольняється, то виконують конструювання і розміщення компонентів з'єднувальних елементів по довжині стикування додаткового залізобетонного шару набетонування з полицею збірної залізобетонної ребристої плити залежно від його НДС в розрахунковому перерізі.

4.3.6 Визначення площі перерізів елементів армування плитних ділянок збірних ребристих плит перекриття, що підсилені.

В граничному стані зусилля від дії опорних (M_{on}) і прогінних (M_{np}) моментів від зовнішнього навантаження сприймаються поздовжньою і поперечною арматурою, яка розташовується в розтягненій зоні розрахункових комбінованих перерізів плитних ділянок збірних плит перекриття. Для визначення армування в перерізі додаткового шару набетонування задаємося величинами захисного шару бетону a_{s1} і a_{s2} відповідно від верхньої і нижньої його граней. Визначаємо площу перерізу армування A_{s1} на 1 м ширини плити у верхній зоні додаткового шару набетонування її розрахункового комбінованого перерізу від дії опорного згинального моменту:

$$A_{s1} = M_{on} / (z_1 \times f_{s1}), \quad (4.57)$$

де M_{on} – найбільший за величиною із згинальних моментів в опорних комбінованих перерізах плитних ділянок збірних ребристих плит;

f_{s1} – розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу;

z_1 – величина відстані від геометричної осі поздовжньої арматури A_{s1} до точки рівноваги в стиснутій зоні розрахункового комбінованого перерізу, яку визначаємо за формулою:

$$z_1 = 0,5t + d - a_{s1}, \quad (4.58)$$

де t – товщина полиці комбінованого перерізу плитної ділянки монолітного залізобетонного перекриття шириною $b=1$ м;

a_{s1} – величина відстані від геометричної осі поздовжньої арматури у верхній зоні додаткового залізобетонного шару набетонування до його верхньої грані.

Визначаємо площу перерізу армування (A_{s2}) на 1 м ширини плити у нижній зоні додаткового шару набетонування її розрахункового комбінованого перерізу від дії прогінного згинального моменту (M_{np}):

$$A_{s2} = (M_{np} - f_{s3} \times A_{s3} \times z_1) / (z_2 \times f_{s2}), \quad (4.59)$$

де M_{np} – найбільший за величиною із згинальних моментів в прогінних комбінованих перерізах плитних ділянок збірних ребристих плит;

f_{s2} – розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури A_{s2} відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу;

A_{s3} – площа перерізу армування верхньої полиці збірної залізобетонної плити, що підсилюється, шириною $b=1$ м;

f_{s3} – розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури A_{s3} відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, якою армована верхня полиця збірної залізобетонної плити, що підсилюється, шириною $b=1$ м;

z_2 – величина відстані від геометричної осі поздовжньої арматури A_{s2} до точки рівноваги в стиснутій зоні розрахункового комбінованого перерізу, яку визначаємо за формулою (4.60):

$$z_2 = d - a_{s1} - a_{s2}, \quad (4.60)$$

де a_{s2} – величина відстані від геометричної осі поздовжньої арматури A_{s2} у нижній зоні додаткового залізобетонного шару набетонування до його нижньої грані.

4.3.7 Перевірка дотриманні вимог міцності на зріз в розрахункових перерізах поблизу опорних ділянок балкового елементу монолітного залізобетонного перекриття, який підсилюється, та визначення площі перерізів елементів додаткового їх армування у разі недостатньої їх несучої здатності.

Міцність на зріз в розрахункових перерізах поблизу опорних ділянок балкового елементу монолітного залізобетонного перекриття при дії в них максимального поперечного зусилля V_{max} буде задовольнятися при дотриманні умови:

$$V_{max} \leq V_c + V_{sw} + V_{s,inc} , \quad (4.61)$$

де V_{max} – максимальне поперечне зусилля, яке виникає в поздовжніх ребрах збірних плит перекриття на ділянках поблизу опор;

$V_c, V_{sw}, V_{s,inc}$ – поперечні внутрішні зусилля, які сприймаються відповідно бетоном, поперечними (вертикальними) арматурними стержнями і похилими елементами (відгинами) шпренгельної затяжки, які визначаємо за наступними залежностями:

$$V_c = (1 + \varphi_f) \times 2\sqrt{f_{c2}} b_w h_0 + 2\sqrt{f_{c1}} b_f d; \quad (4.62)$$

$$V_{sw} = \frac{A_{sw1} f_{sw1} h_0}{s}; \quad (4.63)$$

$$V_{s,inc} = f_{s,inc} \times A_{s,inc} \times \sin \alpha , \quad (4.64)$$

де f_{c2} – розрахунковий опір на стиск важкого бетону відповідно п.3.1 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від його класу, із якого виготовлена (улаштована) збірна залізобетонна плита, що підсилюється;

b_w – ширина ребра приведенного розрахункового комбінованого перерізу збірної плити перекриття, що підсилюється;

b_f – ширина полиці приведенного розрахункового комбінованого перерізу збірної плити перекриття, що підсилюється;

$A_{sw1}; s$ – площа перерізу (A_{sw1}) вертикальних (поперечних) стержнів (хомутів) і їх крок (s) на приопорних ділянках поздовжніх ребер збірних плит перекриття, що підсилюються;

f_{sw1} – розрахунковий опір на розтяг поперечної (вертикальної) арматури A_{sw1} відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, якою армоване поздовжнє ребро збірних плит перекриття, що підсилюються, на приопорних їх ділянках;

φ_f – коефіцієнт, який враховує вплив стиснених полиць в таврових елементах:

$$\varphi_f = 0,75 - \frac{(b'_f - b_w) \times t}{b_w h_0} \leq 0,5, \text{ де } b'_f \leq b_w + 3t. \quad (4.65)$$

Якщо умова (4.61) не задовольняється, то визначаємо необхідну величину площі додаткових поперечних (вертикальних) елементів (A_{sw2}), за допомогою яких буде забезпечуватися несуча здатність на зріз поздовжніх ребер плит перекриття, що підсилені на приопорних ділянках:

$$A_{sw2} = \frac{V_{\max} - V_c - V_{sw} - V_{s,inc}}{f_{sw2}}, \quad (4.66)$$

де f_{sw2} – розрахунковий опір на розтяг додаткового елементу поперечного (вертикального) армування A_{sw2} відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] чи ДБН В.2.6-198:2014 [162] залежно від її класу чи марки сталі.

4.3.8 Конструювання компонентів (елементів) підсилення плитних і балкових елементів монолітного залізобетонного перекриття над приміщеннями І-го поверху будівлі (споруди), яке реконструюється.

Для наочності запропонованої методики розрахунку і проектування конструктивних елементів підсилення плитних і балкових елементів приводимо вузли з підсилення другорядної балки монолітного залізобетонного перекриття при реконструкції приміщень промислової будівлі на рівні II-го поверху, які приведені на рис. 4.13 і рис. 4.18.

Конструктивні рішення з підсилення другорядної балки перекриття на проміжній (а) та крайній (б) опорах

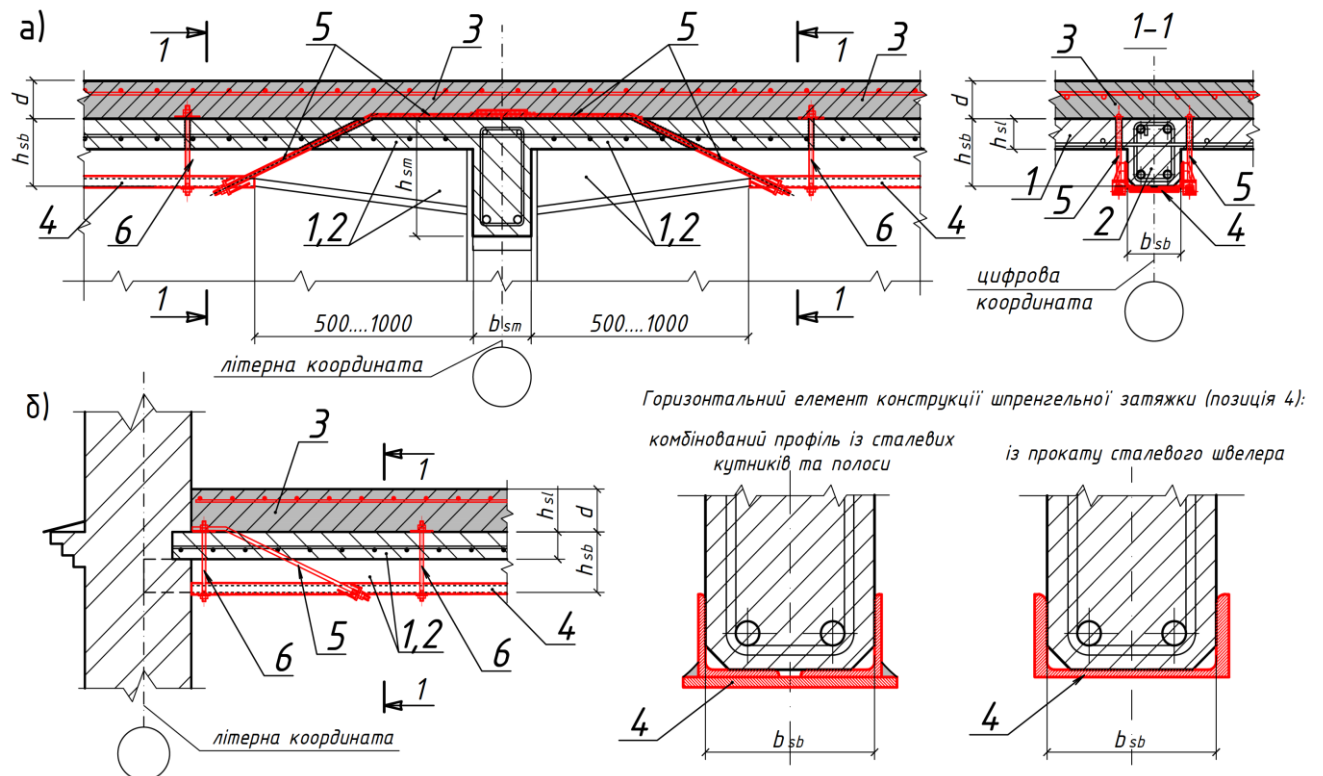


Рис. 4.18 Конструктивне рішення для підсилення другорядної балки монолітного залізобетонного перекриття на проміжній (а) та крайній (б) опорах: 1 – плита перекриття; 2 – другорядна балка перекриття; 3 – монолітний залізобетонний додатковий шар збільшення поперечних перерізів елементів перекриття; 4 – горизонтальний елемент шпренгельного затягування; 5 – похилий елемент шпренгельного затягування; 6 – вертикальний елемент шпренгельного затягування

Конструктивні компоненти (елементи) підсилення плитних і балкових елементів монолітного залізобетонного перекриття шляхом нарощування їх перерізу можуть бути улаштовані (див. рис. 4.13 і рис. 4.18): додатковий залізобетонний шар набетонування (поз. 3), товщиною $d=60...600$ мм - із бетону класів C20/25 (B25, M300), C25/30 (B30, M400), C30/35 (B35, M450), C32/40 (B40, M550), C35/45 (B45, M600) з заповнювачем із дрібнозернистого щебню; армування додаткового залізобетонного шару набетонування (поз. 3) - із стержнів арматурної сталі класу A400C, A500C, A240C; горизонтальний елемент затяжки (поз. 4) – комбінованого (складеного) перерізу - із прокатних гарячекатаних кутиків і листового металу марки сталі C245 чи окремого елемента – із прокатного гарячекатаного швелера (див. рис. 4.18); похилий елемент (поз. 5) і додаткові вертикальні елементи (поз. 6) шпренгельної затяжки - із прокату

гарячекатаного круглого марки сталі С345 чи С355, діаметрами $d=20; 24; 30; 36; 42$ мм.

4.4 Розрахунок міцності на згин і проектування конструктивних елементів підсилення збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття шляхом збільшення її поперечних перерізів в стиснутій та розтягнутій зонах.

4.4.1 Послідовність розрахунку міцності на згин та проектування конструктивних компонентів (елементів) підсилення збірних залізобетонних багатопустотних плит перекриття шляхом одночасного нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням стержнями в розтягувальній зоні.

Розрахунок міцності на згин і проектування конструктивних компонентів (елементів) підсилення збірних залізобетонних багатопустотних плит перекриття шляхом нарощування їх перерізів додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та арматурними стержнями в розтягувальній їх зонах виконуємо в такій послідовності:

- визначення величин розрахункових навантажень; прийняття узагальненої розрахункової схеми та формування приведеного комбінованого розрахункового перерізу напружено-деформованого стану збірних залізобетонних багатопустотних плит перекриття, що підсилюються, при забезпеченні умов міцності на згин (приклад одного із варіантів підсилення плит приведено на рис. 4.19); визначення внутрішніх зусиль в розрахункових комбінованих перерізах збірних залізобетонних багатопустотних плит перекриття, що підсилюються;
- визначення необхідної площі перерізів повздовжніх арматурних стержнів, якими здійснюється підсилення збірних багатопустотних плит перекриття в розтягувальній зоні при визначеній (заданій) товщині (d) додаткового залізобетонного шару набетонування в стисненій зоні, при забезпеченні умов міцності на згин в їх розрахункових комбінованих перерізах;

Підсилення залізобетонних багатопустотних плит перекриття, товщиною перерізу $t=220$ мм, шляхом одночасного нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром і арматурними стержнями відповідно в його стисненій і розтягувальній зонах

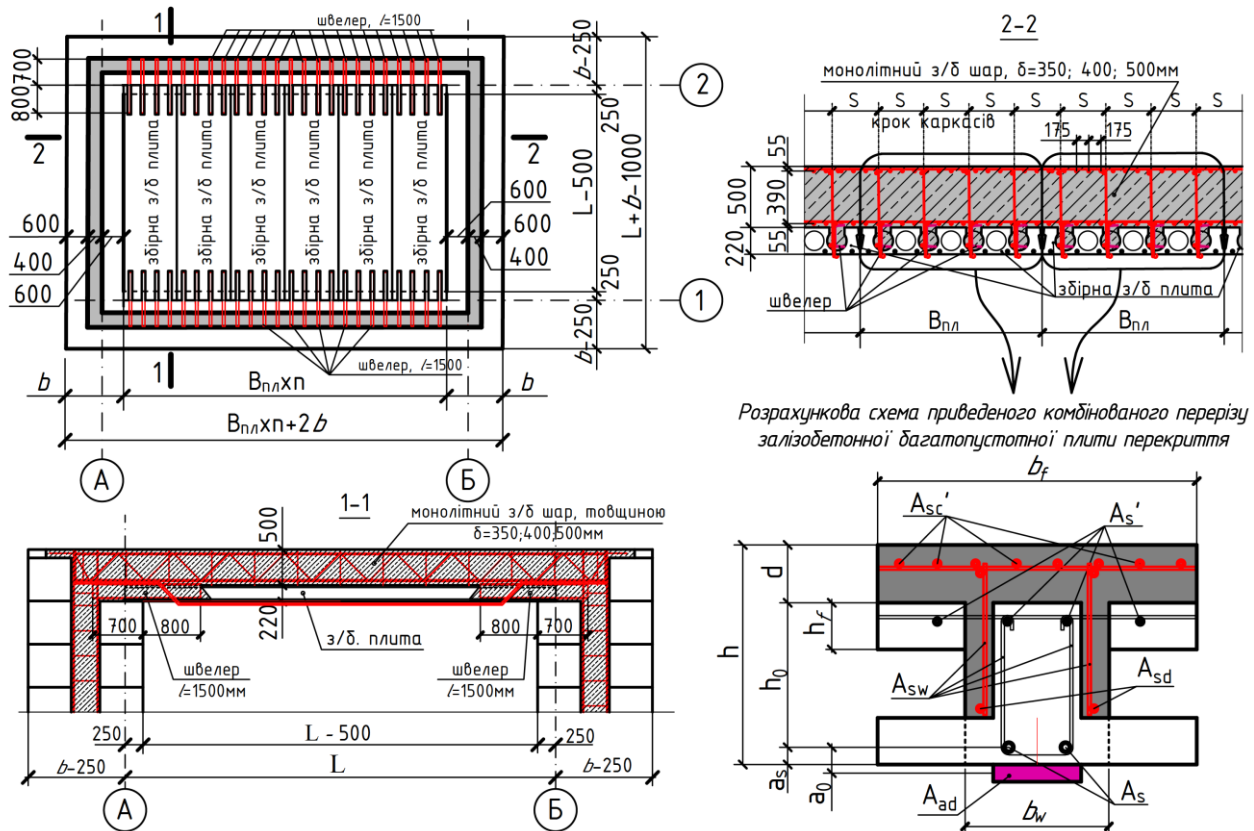


Рис. 4.19 - Конструктивно-розрахункові схеми при підсилення залізобетонних багатопустотних плит покриття окремої будівлі, висотою (товщиною) перерізу $t=220$ мм, шляхом одночасного нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром і арматурними стержнями відповідно в його стисненій і розтягувальній зонах

- визначення площі перерізів елементів армування додаткового залізобетонного шару набетонування в стисненій зоні комбінованого перерізу збірних багатопустотних плит перекриття, що підсилюються;
- визначення зусилля зсуву між верхньою площиною збірної залізобетонної плити перекриття і нижньою площиною додаткового залізобетонного шару набетонування залежно від випадку напружено-деформованого стану в їх розрахунковому комбінованому перерізі при згині;
- конструювання компонентів (елементів) підсилення перерізів збірних залізобетонних багатопустотних плит перекриття.

4.4.2 Розрахунок міцності на згин в комбінованому приведеному перерізі залізобетонної багатопустотної плити перекриття (покриття), яка підсилюється шляхом одночасного нарощування додатковими залізобетонним шаром і арматурними стержнями відповідно в стиснутій і розтягувальній зонах.

Міцність на згин в розрахунковому комбінованому приведеному перерізі залізобетонної багатопустотної плити перекриття (покриття), яка підсилюється одночасно шляхом нарощування стиснутої і розтягнутої зон її перерізів, визначаємо відповідно залежності (4.67), яка є умовою рівноваги відносно рівнодіючої осі стисненої зони бетону (див. розрахункові схеми на рис. 4.20):

$$M = f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_a \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f'_{sc} A'_{sc} \times (0,5x - a'_{sc}), \quad (4.67)$$

де M – максимальне значення несучої здатності на згин від дії внутрішніх зусиль в розрахункових комбінованих перерізах (див. рис. 4.20) в прогоні збірної залізобетонної багатопустотної плити, що підсилюється;

h_0 – робоча (ефективна) висота приведенного двотаврового перерізу існуючої залізобетонної багатопустотної плити, що підсилюється, величину якої визначаємо за виразом (4.68):

$$h_0 = h_{sl} - a_s; \quad (4.68)$$

h_{sl} – загальна висота (товщина) приведенного двотаврового перерізу існуючої збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється;

a_s – величина захисного шару бетону: відстань від нижньої грані до геометричної горизонтальної осі поздовжнього армування (A_s) в розтягувальній зоні в приведеному (комбінованому) перерізі збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється;

A_s – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, якими виконане армування в розтягувальній зоні перерізу існуючої залізобетонної багатопустотної плити, що підсилюється;

A_a – сумарна площа перерізу додаткового горизонтального елемента, який улаштовується із арматурної сталі (A_{sd}) чи гарячекатаного прокату (A_{ad}), котрим здійснюється додаткове армування в розтягувальній зоні

комбінованого перерізу збірної залізобетонної багатопустотної плити, що підсилюється;

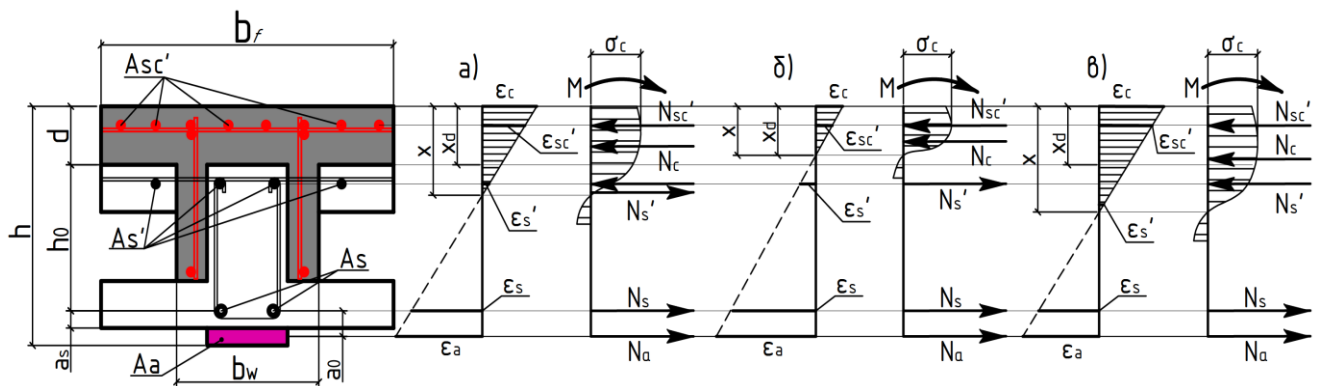


Рис. 4.20 - Варіанти (а, б, в) граничного напружено-деформованого стану в розрахунковому комбінованому перерізі, що працює на згин, в залізобетонній багатопустотній плиті перекриття, яка підсилена одночасно в стисненій і розтягувальній його зонах, залежно від положення нейтральної лінії (величини висоти стисненої зони бетону, x)

f_s – розрахунковий опір на розтяг поздовжньої арматури (A_s) відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, якою виконане армування нижньої розтягувальної зони приведенного двотаврового перерізу існуючої збірної залізобетонної багатопустотної плити, що підсилюється;

f_{sc}' – розрахунковий опір на стиск поздовжньої арматури (A_{sc}') відповідно п.3.2 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від її класу, якою виконується армування верхньої стисненої зони додаткового залізобетонного шару (d) набетонування, яких здійснюється підсилення комбінованого перерізу існуючої збірної залізобетонної багатопустотної плити, що підсилюється;

f_{sd} – розрахунковий опір на розтяг додаткового горизонтального елемента загальною площею (A_a), який виготовляється із арматурної сталі (A_{sd}) чи гарячекатаного прокату (A_{ad}), котрим здійснюється армування збірної залізобетонної багатопустотної плити, що підсилюється в розтягувальній зоні перерізу, відповідно норм ДБН В.2.6-198:2014 [162];

a_0 – відстань між геометричними горизонтальними осями існуючої поздовжньої арматури (A_s) і додатковим горизонтальним елементом (A_a) із арматурної сталі (A_{sd}) чи гарячекатаного прокату (A_{ad}), яка приймається в рівнянні зі знаком «+» при $h_0 + a_0 \geq h_0$ та зі «-» знаком при $h_0 - a_0 < h_0$;

A'_{sc} – сумарна площа перерізу поздовжніх арматурних стержнів, котрими здійснюється армування додаткового залізобетонного шару набетонування (d) в стиснутій зоні комбінованого перерізу збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється;

a_{sc}' – величина захисного шару бетону: відстань від геометричної горизонтальної осі поздовжньої арматури (A_{sc}') додаткового армування шару набетонування (d) до верхньої грані в комбінованому перерізі збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється;

x – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому комбінованому перерізі на ділянці плити, що сприймає навантаження від згинального моменту (M), яка визначається за залежністю (4.69):

$$x = (f_s A_s \times + f_{sd} A_a + f_s' A_s') / (f_{cd} b), \quad (4.69)$$

де f_{cd} – розрахунковий опір на стиск важкого бетону відповідно п.3.1 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від його класу, із якого улаштовується (виготовляється) додатковий залізобетонний шар набетонування (d) при підсиленні збірної залізобетонної багатопустотної плити;

A_s' – сумарна площа поздовжньої арматури, якою виконане армування в стисненій зоні приведенного двотаврового перерізу збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття до її підсилення;

f_s' – розрахункова міцність на розтяг поздовжньої арматури (A_s'), якою виконане армування в стисненій зоні приведенного двотаврового перерізу збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється;

b – розрахункова ширина по верхній стисненій грані приведенного двотаврового комбінованого перерізу збірної залізобетонної

багатопустотної плити перекриття, яка приймається згідно розрахункової схеми на рис. 4.19 і рис. 4.20 рівною величині $b=b_f$;

d - товщина додаткового залізобетонного шару набетонування для підсилення збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття шляхом нарощування його перерізів на рівні верхньої площини, мінімальна величина якої при визначенні несучої здатності плити може попередньо прийматися (задаватися) згідно конструктивних вимог або визначатися за залежністю (4.70):

$$d_{\max} = \frac{M_{cw}}{f_s A_s} - 0,5x - h_0, \quad (4.70)$$

де M_{cw} – величина позитивного максимального згинального моменту, що діє в розрахунковому комбінованому перерізі на ділянці в прогоні збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється.

4.4.3 Визначення необхідної площі додаткового армування (A_a) в розтягувальній зоні комбінованого перерізу залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється, при забезпеченні умов міцності на згин при дії позитивного згинального моменту (M_{cw}) в прогоні (див. розрахункові схеми комбінованого приведенного перерізу плити на рис. 4.20).

Необхідну сумарну площу поперечного перерізу додаткового армування (A_a) в розтягувальній зоні комбінованого приведенного перерізу залізобетонної багатопустотної плити перекриття визначаємо за рівнянням (4.71):

$$A_a = \frac{f_c b}{f_{sd}} \times (-2M + f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x_H) - (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x_H) \times (1 \pm d \pm a_0 - 0,5x_H)); \quad (4.71)$$

де x_H – висота стиснутої зони бетону в розрахунковому приведенному двотавровому перерізі залізобетонної багатопустотної плити перекриття до її підсилення (без елементів (компонентів) підсилення) при армуванні його тільки існуючими арматурними стержнями в розтягнутій зоні загальною площею A_s , яка визначається за залежністю (4.72) за умови рівноваги внутрішніх зусиль на горизонтальну вісь перерізу :

$$x_n = (f_s A_s) / (f_c b), \quad (4.72)$$

де f_c – розрахунковий опір на стиск важкого бетону відповідно п.3.1 норм ДБН В.2.6-98:2009 [159] залежно від його класу, із якого виготовлена збірна залізобетонна багатопустотна плита, що підсилюється.

Розрахунок величини сумарної площі додаткового армування (A_a) збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється, відповідно залежності (4.71) не завжди буде оптимальний (ефективний з економічної точки зору), тому що в окремих випадках при нарощуванні перерізу шляхом набетонування встановлення додаткового армування (A_a) в розтягувальній зоні комбінованого перерізу може бути непотрібне, бо для міцності на згин буде достатньо вже існуючої в комбінованому перерізі площі існуючого армування (A_s) плити в її розтягувальній зоні. Тому для удосконалення методики розрахунку компонентів підсилення був запропонований додатковий коефіцієнт (n), який буде враховувати відношення площ армування A_a до A_s , значення якого визначаємо за залежністю (4.73):

$$n = A_a / A_s. \quad (4.73)$$

Величину коефіцієнта (n) визначаємо за залежностями (4.74)-(4.76):

$$0,5x_n \cdot n^2 + (h_0 + d \pm a_0 + x_n) \cdot n + (h_0 + d + 0,5x_n - \frac{M}{f_s A_s}) = 0; \quad (4.74)$$

$$D = (h_0 + d \pm a_0 + x_n)^2 - 4 \times 0,5x_n \times (h_0 + d + 0,5x_n - \frac{M}{f_s A_s}); \quad (4.75)$$

$$n_{1,2} = \frac{-(h_0 + d \pm a_0 + x_n) \pm \sqrt{D}}{x_n}. \quad (4.76)$$

При значенні коефіцієнта $n \leq 0$ підсилення збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття одночасно шляхом нарощування перерізу в стиснутій і розтягувальній зонах непотрібне, буде достатньо виконати підсилення елемента тільки в стисненій його зоні шляхом улаштування додаткового залізобетонного шару набетонування визначеної товщини (d).

При значенні коефіцієнта $n > 0$ необхідну площу перерізу додаткового армування (A_a) в розтягувальній зоні комбінованого перерізу збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється, можемо визначити за залежністю (4.77):

$$A_a = (n + 0,1) \times A_s. \quad (4.77)$$

Величину необхідної площі армування (A'_{sc}) додаткового залізобетонного шару набетонування в комбінованому перерізі збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття визначаємо за залежністю (4.78) при $x < d$ та залежністю (4.79) при $x > d$ за умови рівноваги при забезпеченні умов міцності на згин відносно рівнодіючої осі існуючого поздовжнього армування (A_s) в його розтягувальній зоні:

при $x < d$:

$$A'_{sc} = \frac{M - f_{c1} b x \times (h_0 + d - 0,5x)}{f_{sc} \times (h_0 + d - a'_{sc})}; \quad (4.78)$$

при $d + a'_s < x \leq d + h_f$:

$$A'_{sc} = \frac{M - f_{c1} b d \times (h_0 + d / 2) - f_c b (x - d) \times (h_0 - (x - d) / 2) - A'_s f'_s (h_0 - a'_s)}{f_{sc} \times (h_0 + d - a'_{sc})}, \quad (4.79)$$

де a'_s – величина захисного шару бетону: відстань від геометричної горизонтальної осі існуючої поздовжньої арматури (A'_s) до верхньої грані приведенного двотаврового перерізу збірної залізобетонної багатопустотної плити без компонентів його підсилення (без верхнього шару набетонування).

При величині площі армування верхньої стиснутої зони менше нуля ($A'_s \leq 0$), армування виконуємо конструктивно. При $A'_s > 0$ виконуємо корегування величини сумарної площі перерізу (A_a) поздовжніх горизонтальних елементів із арматурної сталі (A_{sd}) чи гарячекатаного прокату (A_{ad}) з урахуванням величин розрахункових опорів на розтяг існуючих арматурних стержнів (f_s) і поздовжнього конструктивного елементу додаткового армування в розтягувальній

зоні (f_{sd} чи f_{ad}) збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, за залежністю (4.80):

$$A_a = f_s / f_{sd} \times (A_s \times (n + 0,1) + A'_s). \quad (4.80)$$

4.4.4 Перевірка міцності на згин в розрахунковому комбінованому перерізі збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється, при дії в ньому позитивного згинального моменту (M_{cw}) (див. розрахункові схеми комбінованого перерізу плити на рис. 4.19 і рис. 4.20).

Перевірку міцності на згин в розрахунковому комбінованому двотавровому перерізі збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється одночасно в стисненій і розтягувальній зонах, виконуємо за залежністю (4.81) при дотриманні в ньому рівноваги відносно результуючої осі стиснутої бетонної зони при зовнішній дії позитивного згинального моменту (M_{cw}):

$$M_{cw} \leq f_s A_s \times (h_0 + d - 0,5x) + f_{sd} A_a \times (h_0 + d \pm a_0 - 0,5x) + f'_{sc} A'_{sc} \times (0,5x - a'_{sc}). \quad (4.81)$$

Виконуємо перевірку необхідної висоти (товщини) (d) додаткового залізобетонного шару набетонування для підсилення на рівні верхньої площини збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття за співвідношенням (4.82) при дотриманні умови міцності на згин в його розрахунковому комбінованому двотавровому перерізі:

$$d = \frac{M \pm f_{sd} A_a \cdot a_0}{f_s A_s + f_{sd} A_a} - h_0 - \frac{f_s A_s + f_{sd} A_a}{2 f_{cd} b}. \quad (4.82)$$

Отримане значення висоти додаткового шару (d) порівнюємо з товщиною шару, яка була попередньо прийнята чи визначена за співвідношенням (4), для проектування конструкції підсилення плити перекриття застосовуємо більшу із величин висоти ($d_{\max}$) додаткового шару набетонування.

4.4.5 Визначення зусилля зсуву (V_{hv}), яке виникає вздовж площини стикування додаткового залізобетонного шару набетонування, товщиною (висотою) d , з верхньою площиною збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття залежно від випадку напружено-деформованого стану (НДС) в його розрахунковому комбінованому перерізі при згині.

Величину сумарного зусилля зсуву (V_{hv}) між бетонними компонентами шару набетонування і плити визначаємо залежно від випадку граничного напружено-деформованого стану (НДС) в їх розрахунковому комбінованому перерізі при згині (див. рис. 4.21):

- випадок при дії позитивного моменту M_{cw} в розрахунковому перерізі в прогоні плити, при $x_c \leq d$ (дивись розрахункову схему на рис. 4.21,а):

$$V_{hv} = C = f_{c1} b_f x_c + f'_{sc} A'_{sc}; \quad (4.83)$$

$$V_{hv} = T = f_a A_a + f_s A_s + \sigma'_s A'_s, \quad (4.84)$$

$$\text{де } \sigma'_s = \varepsilon'_s E_s; \quad \varepsilon'_s = \varepsilon_c x_c / (d + a'_s - x_c).$$

- випадок при дії позитивного моменту M_{cw} в розрахунковому перерізі в прогоні плити, при $d < x_c \leq d + h_f$ (дивись розрахункову схему на рис. 4.21,б):

при $x_c \leq d + a'_s$:

$$V_{hv} = C = b_f [f_{c1} d + f_c (x_c - d)] + f'_{sc} A'_{sc} < f_a A_a + f_s A_s + \sigma'_s A'_s, \quad (4.85)$$

при $x_c > d + a'_s$:

$$V_{hv} = C = b_f [f_{c1} d + f_c (x_c - d)] + f'_{sc} A'_{sc} < f_a A_a + f_s A_s - \sigma'_s A'_s, \quad (4.86)$$

- випадок при дії позитивного моменту M_{cw} в розрахунковому перерізі в прогоні плити, при $x_c > d + h_f$ (дивись розрахункову схему на рис. 4.21,в):

$$\begin{aligned} \text{при } x_c > d + a'_s: V_{hv} = C = f_{c1} b_f d + f_c [b_f (x_c - d) + b_w (x_c - d - h_f)] + \\ + f'_{sc} A'_{sc} < f_a A_a + f_s A_s - \sigma'_s A'_s. \end{aligned} \quad (4.87)$$

Сумарне зусилля зсуву (V_{hv}), яке виникає на межі стикування різних бетонних компонентів у двохшарових залізобетонних балкових елементах

конструкції перекриттів, повинно бути менше міцності на зсув компонентів з'єднувальних елементів:

$$V_{hv} \leq P_{Rd}, \quad (4.88)$$

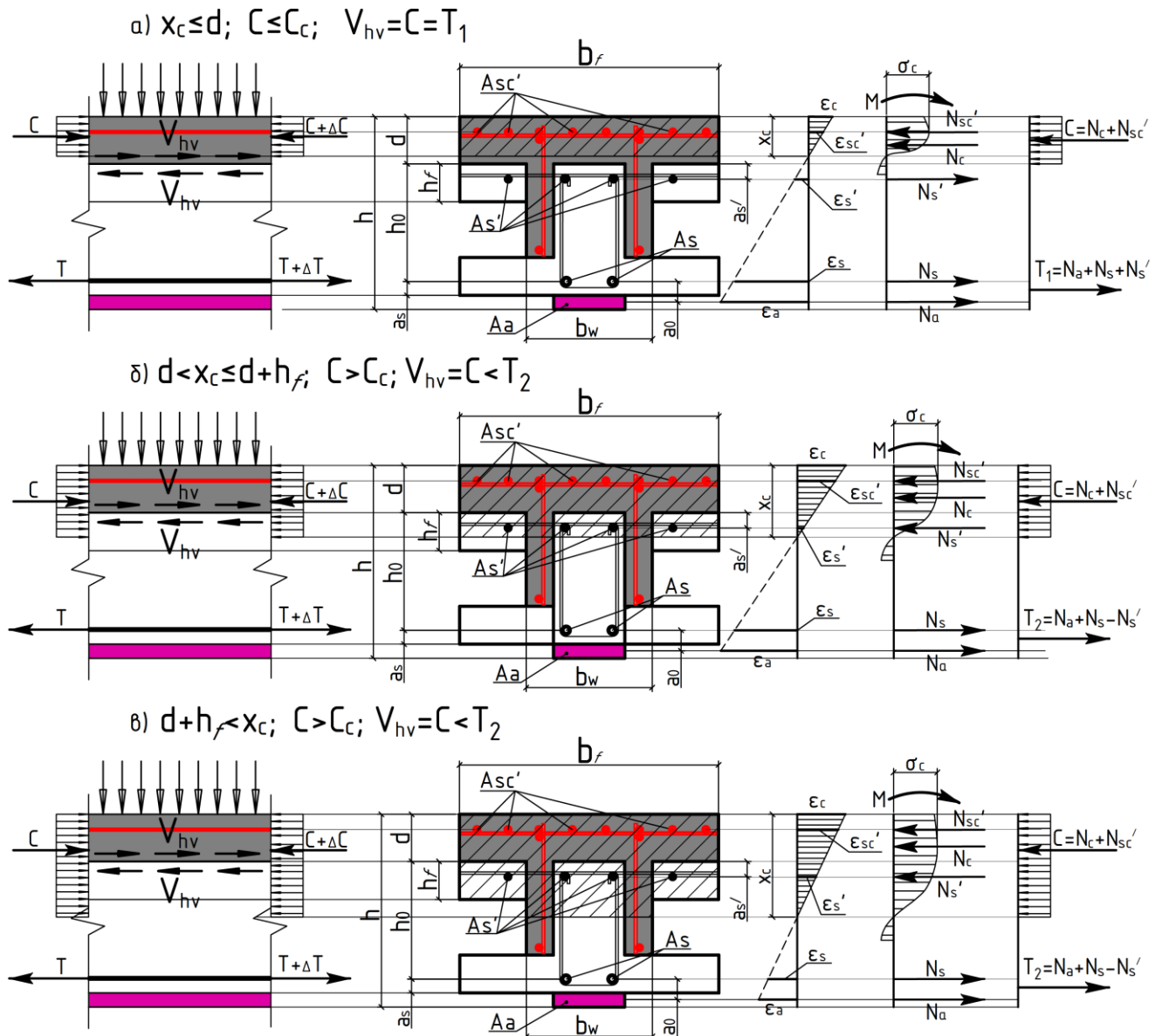


Рис. 4.21 - Горизонтальна зсувна сила (V_{hv}) на межі розділу між верхнім додатковим залізобетонним шаром набетонування та верхньою площиною залізобетонної багатопустотної плити перекриття, що підсилюється, залежно від граничного НДС в розрахунковому комбінованому перерізі при дії позитивного моменту у її прогоні: а) нейтральна лінія у межах висоти шару набетонування, при $x_c \leq d$; б) нейтральна лінія у межах висоти верхньої полиці приведенного комбінованого перерізу, при $d < x_c \leq d + h_f$; в) нейтральна лінія у межах висоти вертикального ребра приведенного комбінованого двотаврового перерізу, при $d + h_f < x_c$

де P_{Rd} – несуча здатність на зсув різної конструктивної форми компонента з'єднувального елемента, яка визначається згідно норм ДСТУ Б В.2.6-216:2016 [163].

Якщо умова міцності на зсув (4.88) задовольняється, то виконують конструювання і розміщення компонентів з'єднувальних елементів по довжині стикування між залізобетонним шаром набетонування і збірною залізобетонною багатопустотною плитою перекриття, що підсилюється, залежно від НДС в її розрахунковому комбінованому перерізі при згині.

4.4.6 Практичне застосування запропонованої методики з розрахунку міцності на згин і проектування конструктивних елементів (компонентів) з підсилення залізобетонних багатопустотних плит перекриття (покриття) шляхом одночасного нарощування перерізів додатковими залізобетонним шаром і арматурними стержнями відповідно в їх стисненій і розтягувальній зонах.

Запропонована методика з розрахунку міцності на згин і проектування конструктивних рішень з підсилення збірних залізобетонних багатопустотних плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної зтяжки чи поздовжніх арматурних стержнів дозволяє розрахувати необхідну площу додаткового армування (A_a), враховуючи наявне армування (A_s) збірних плит перекриття, залежно від прийнятою висоти (товщини, d) шару набетонування, величини довжини розрахункового прогону (L , м) та необхідної величини квазістатичного еквівалентного розрахункового навантаження ($q=P_1$, кПа) для відповідних приміщень укриттів класів I-IV згідно вимог норм [164]. Так, наприклад, в результаті розрахунків були отримані величини значень коефіцієнту сумарного армування (ρ_b) нижньої розтягнутої зони в комбінованому перерізі збірних залізобетонної багатопустотної плити перекриття залежно від товщини та класу бетону шару надбетування і величини їх розрахункового прогону (L) для приміщень укриття класу IV, які приведені нижче в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Величини коефіцієнтів сумарного армування (ρ_b) (при $f_s=365$ МПа) нижньої розтягнутої зони в комбінованому перерізі збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття типу 1ПК, шириною перерізу $b_f=1$ м, яка підсилена в стисненій зоні додатковим шаром набетонування (d) із бетону класу C25/30 (марка M400) і C45/55 (M700), товщиною $d=110$ мм; 200 мм і 300 мм та в розтягувальній зоні – додатковим армуванням поздовжніми стержнями, залежно від величини її розрахункового прогону (L , в м) при переобладнанні підвального приміщення будівлі в приміщення подвійного призначення під укриття IV-го класу, яке повинне сприймати квазістатичне еквівалентне розрахункове навантаження $q=P_1=133,75$ кПа (при $\Delta P_{ex}=100$ кПа згідно діючих норм [164]), в процентах (%) від площі поперечного приведенного перерізу існуючої плити

Товщина (висота) додаткового шару (d) набетонування (в мм) та клас (марка) бетону		Величина коефіцієнтів сумарного армування (ρ_b) (при $f_s=365$ МПа) нижньої розтягнутої зони в комбінованому перерізі збірної залізобетонної багатопустотної плити перекриття типу 1ПК, шириною перерізу $b_f=1$ м залежно від величини її розрахункового прогону (L , м), в процентах (%) від площі перерізу існуючої плити						
		3,0	3,6	4,8	5,4	6,0	6,3	7,2
110 мм	C25/30 (M400)	0,96	1,38	3,10	3,46	3,85	4,26	5,67
	C45/55 (M700)	0,97	1,416	3,26	3,65	4,08	4,53	6,13
200 мм	C45/55 (M700)	0,535	0,782	1,42	1,83	2,30	2,57	3,53
300 мм	C25/30 (M400)	0,315	0,46	0,837	1,075	1,35	1,51	2,073
	C45/55 (M700)	0,32	0,49	0,853	1,10	1,40	1,56	2,16

4.5 Розрахунок міцності на згин і проектування конструктивних елементів підсилення залізобетонної балки перекриття шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні її перерізу.

Приклад. Дано: залізобетонна балка довжиною $L=2,1$ м, з розмірами поперечного перерізу $h \times b=205 \times 99$ мм (див. рис. 4.22), яка виготовлена із важкого бетону класу C32/40 (B40) ($f_{ck,prism}=29$ МПа, $f_{cd}=22$ МПа, $f_{stk,0.05}=2,1$ МПа, $E_{cm}=36 \times 10^3$ МПа, $E_{cd}=28,5 \times 10^3$ МПа) і армована в стисненій зоні арматурою $2\varnothing 5$ мм, класу Вр-I ($A_s'=0,393$ см²; $f_{yk}(\sigma_T)=410$ МПа; $E_{sc}=1,7 \times 10^5$ МПа), в розтягненій зоні перерізу арматурою $2\varnothing 14$ мм, класу A400C (A-III) ($A_s=3,08$ см²; $f_{yk}(\sigma_T)=400$ МПа; $f_{tk}(\sigma_B)=500$ МПа; $E_s=2 \times 10^5$ МПа). Підсилення розтягненої зони

перерізу балки виконано арматурою $2\varnothing 10$ мм, класу А600С (А-IV) ($A_{sd}=1,57 \text{ см}^2$; $f_{yk}(\sigma_T)=600 \text{ МПа}$; $f_{tk}(\sigma_B)=700 \text{ МПа}$; $E_{sd}=1,9 \times 10^5 \text{ МПа}$), яка приварюється переривистими зварними швами до основної арматури $\varnothing 14$ мм. Місце обриву додаткової арматури розташоване на відстані $x_A=300$ мм від опор балки (дивись схему і вузол А на рис. 4.22). Балка навантажена симетрично в середині прогону двома зосередженими зусиллями, які розташовані на відстані $c=630$ мм від опор, розрахункова довжина прогону балки становить $L_0=1,9$ м (див. рис. 4.22). Значення експлуатаційного моменту, при якому проводиться підсилення балки, становить $M_{\text{експл}}=21,18 \text{ кН}\times\text{м}$. Значення величин a_s , a_s' , a_{sd} становить $a_s=a_s'=20$ мм, $a_{sd}=8$ мм.

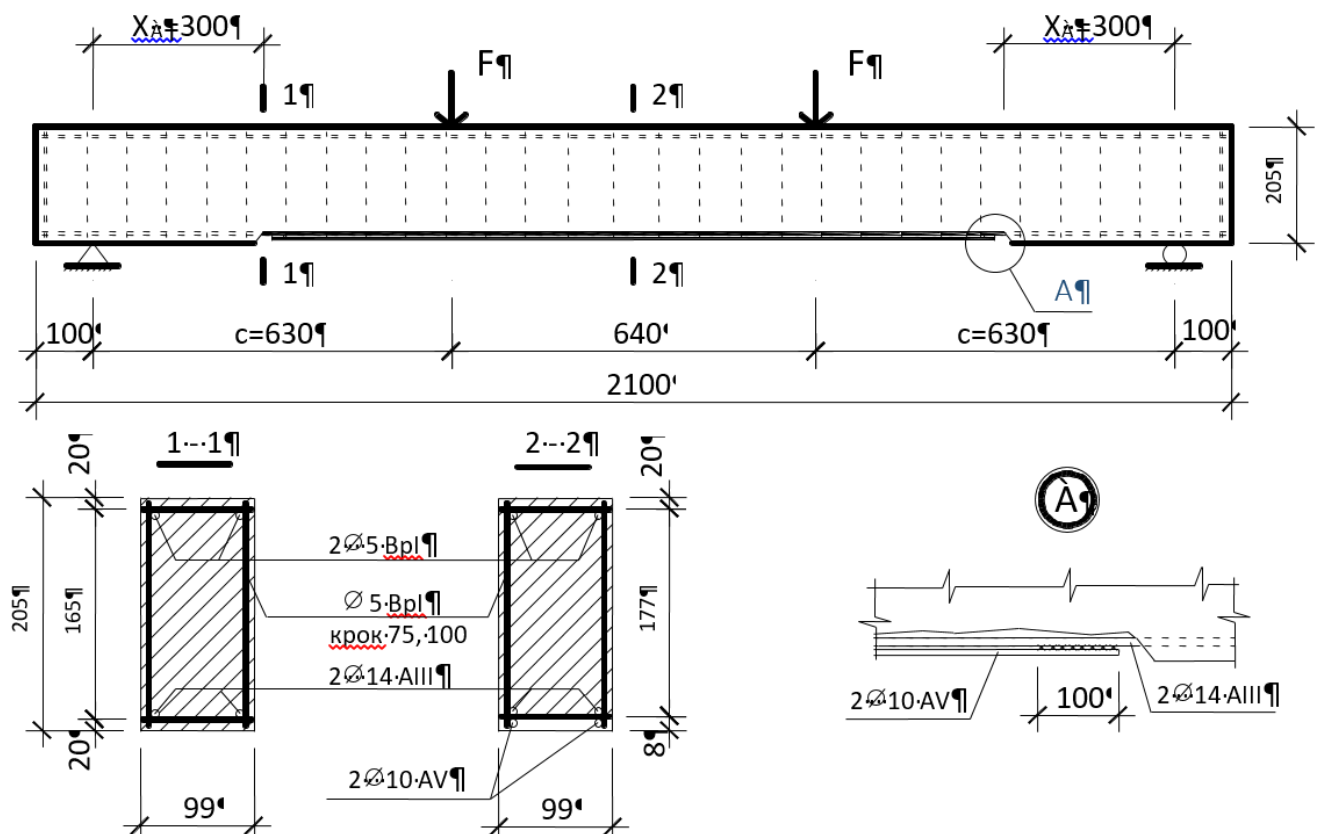


Рис. 4.22. Розрахункова схема залізобетонної балки, що підсилюється

Необхідно визначити міцність на згин залізобетонної балки, яка підсилена в розтягнутій зоні додатковою арматурою, яка приварена до основної поздовжньої.

Рішення: Визначаємо за формулою (2.21) величину напруження в основній розтягнутій поздовжній арматурі S при дії експлуатаційного моменту $M_{\text{експл}}=21,18 \text{ кН}\times\text{м}$:

$$\sigma_s = \psi_s M_{\text{експл}} / (A_s z) = 1,0 \times 21,18 \times 10^5 / (3,08 \times 16,08) = 42765 \text{ Н/см}^2 = 427,65 \text{ МПа},$$

де величини z і ψ_s визначаємо нижче за залежностями (4.89) і (4.92):

$$\begin{aligned} z &= h_0 \times [1 - (a_s' / h_0 \times \varphi_f + \xi^2 / 2) / (\varphi_f + \xi)] = \\ &= 18,5 \times [1 - (2 / 18,5 \times 0,01125 + 0,23^2 / 2) / (0,23 + 0,01125)] = 16,08 \text{ см}, \end{aligned} \quad (4.89)$$

де значення коефіцієнтів φ_f і ξ визначаємо за залежностями (4.90) і (4.91):

$$\varphi_f = [\alpha_s' A_s' / (2\nu)] / (bh_0) = [4,72 \times 0,393 / (2 \times 0,45)] / (9,9 \times 18,5) = 0,01125; \quad (4.90)$$

де $\nu = 0,45$; $\alpha_s' = E_{sc} / E_{cm} = 1,7 \times 10^5 / 0,36 \times 10^5 = 4,72$; $h_0 = h - a_s = 20,5 - 2 = 18,5 \text{ см}$;

$$\begin{aligned} \xi &= 1 / \{ \beta + [1 + 5(\delta + \lambda)] / (10\mu\alpha_s) \} = \\ &= 1 / \{ 1,8 + [1 + 5 \times (0,2145 + 0,01)] / (10 \times 0,0151 \times 5,55) \} = 0,23; \end{aligned} \quad (4.91)$$

де $\lambda = \varphi_f (1 - a_s' / h_0) = 0,01125 \times (1 - 2 / 18,5) = 0,01$; $\mu = A_s / bh = 3,08 / (9,9 \times 20,5) = 0,0151$;

$$\delta = M_{\text{експл}} / (bh_0^2 f_{ck,prism}) = 21,18 \times 10^5 / (9,9 \times 18,5^2 \times 2900) = 0,2145; \quad \beta = 1,8;$$

$$\alpha_s = E_s / E_{cm} = 2 \times 10^5 / (0,36 \times 10^5) = 5,55;$$

$$\psi_s = 1,25 - \varphi_{ls} \varphi_m = 1,25 - 1,1 \times 0,117 = 1,12 > 1,0; \text{ приймаємо } \psi_s = 1,0, \quad (4.92)$$

де коефіцієнт φ_m визначаємо за формулами (4.93) і (4.94):

$$\varphi_m = f_{stk,0.05} W_{pl} / M_{\text{експл}} = 210 \times 1188,7 / (21,18 \times 10^5) = 0,117; \quad (4.93)$$

$$W_{pl} = bh^2 / 3,5 = 9,9 \times 20,5^2 / 3,5 = 1188,7 \text{ см}^3. \quad (4.94)$$

Так, як $\sigma_s = 427,65 \text{ МПа} > f_{yk}(\sigma_T) = 400 \text{ МПа}$, то необхідно виконати підсилення перерізів залізобетонної балки, що працюють на згин, шляхом нарощування їх в розтягувальній зоні за допомогою додаткових арматурних стержнів $2\varnothing 10 \text{ мм}$, класу А600С (А-IV).

Визначаємо за формулами (2.18), (2.19) величину напруження в основній розтягнутій поздовжній арматурі S та в додатковій S_d при максимальній несучій здатності балки при умові $f_{yks}(\sigma_T) + f_{yk,sd}(\sigma_T) = 400 + 600 = 1000 \text{ МПа} > \gamma_u \sigma_u = 500 \text{ МПа}$:

$$\sigma_{su} = \gamma_u \sigma_u = \gamma_u f_{tk}(\sigma_B) = 1,0 \times 500 \text{ МПа}; \quad \sigma_{sd} = \gamma_u f_{tk}(\sigma_B) - f_{yks}(\sigma_T) = 1,0 \times 500 - 400 = 100 \text{ МПа}.$$

Визначаємо за формулою (2.15) висоту стисненої зони бетону перерізу, нормального до поздовжньої осі балки, на ділянці, яка підсилена в розтягненій зоні шляхом встановлення додаткової арматури:

$$x_{\text{red}} = [f_{tk}(\sigma_B)A_s + \sigma_{sd}A_{sd} - f_{sc}A_s'] / (f_{ck,prism}b) = (500 \times 3,08 + 100 \times 1,57 - 0,393 \times 410) / (29 \times 9,9) = 5,35 \text{ см};$$

Перевіряємо дотримання умови залежності $x_{\text{red}}/h_{0,d} \leq \xi_R$:

$x_{\text{red}}/h_{0,d} = 5,35/19,7 = 0,271 \leq \xi_R = \omega / [1 + f_{yk}(\sigma_T) / f_{tk}(\sigma_B) \times (1 - \omega/1,1)] = 0,618 / [1 + 400/500 \times (1 - 0,618/1,1)] = 0,4576$, умова задовольняється, перерізи залізобетонної балки, що працюють на згин, є не переармовані,

$$\text{де } \omega = \alpha - 0,008 \times f_{ck,prism} = 0,85 - 0,008 \times 29 = 0,618.$$

Визначаємо за формулою (2.14) несучу здатність нормальних до поздовжньої осі перерізів залізобетонної балки на ділянках в перерізах (2-2), що підсилюються шляхом встановлення додаткової арматури в розтягненій зоні:

$$M_{\text{red}} = f_{ck,prism} b x_{\text{red}} \times (h_0 - x_{\text{red}}/2) + f_{yk}(\sigma_T) A_s' (h_0 - a_s') + \sigma_{sd} A_{sd} \times (h_{0d} - h_0) = 2900 \times 9,9 \times 5,35 \times (18,5 - 5,35/2) + 41000 \times 0,393 \times (18,5 - 2) + 10000 \times 1,57 \times (19,7 - 18,5) = 2715400,5 \text{ Н} \times \text{см} = 27,15 \text{ кН} \times \text{м},$$

$$\text{де } h_{0d} = h - a_{sd} = 20,5 - 0,8 = 19,7 \text{ см}.$$

Так, як $M_{\text{red}} = 27,15 \text{ кН} \times \text{м} > M_{\text{експл}} = 21,18 \text{ кН} \times \text{м}$, міцність на згин залізобетонної балки в перерізах (2-2) буде достатньою для сприйняття згинального моменту максимальної величини.

Визначаємо напруження в крайньому волокні перерізу основної поздовжньої арматури S в перерізах (1-1) залізобетонної балки поблизу місць обриву додаткової арматури S_d при дії на середині прогону балки згинального моменту $M_{\text{red}} = 27,15 \text{ кН} \times \text{м}$ та дотримання умови нерівності (4.95):

$$\sigma_{s(1-1)} = \kappa \sigma M_{\text{red}(1-1)} / (A_s z) \leq \gamma_y f_{yk}(\sigma_T); \quad (4.95)$$

$$\sigma_{s(1-1)} = \kappa \sigma M_{\text{red}(1-1)} / (A_s z) = 1,6 \times 12,928 \times 10^5 / (3,08 \times 16,11) = 9441,58 \text{ Н} \times \text{см} = 94,42 \text{ МПа} < \gamma_y f_{yk}(\sigma_T) = 0,88 \times 400 = 352 \text{ МПа}, \text{ переріз основної поздовжньої арматури } S \text{ в перерізі (1-1) балки працює в пружній стадії},$$

де γ_y – коефіцієнт пониження межі пластичності металу, який враховує умови роботи перерізу арматури після впливу на нього електродугового зварення, приймаємо $\gamma_y=0,88$. На ділянках арматури, перерізи яких не зазнали впливу електродугового зварення приймаємо $\gamma_y=1,0$;

k_σ - коефіцієнт, який враховує нерівномірний розподіл напружень в перерізах існуючої поздовжньої робочої арматури S на ділянках поблизу місць приварення до них додаткових арматурних стержнів S_d , який приймаємо рівний величині $k_\sigma=1,6$ (дивись пояснення до формули (2.28) в розділі 2);

$$z=h_0 \times [1 - (a_s/h_0 \times \varphi_f + \xi^2/2) / (\varphi_f + \xi)] = \\ = 18,5 \times [1 - (2/18,5 \times 0,01125 + 0,26^2/2) / (0,26 + 0,01125)] = 16,11 \text{ см},$$

де значення коефіцієнта ξ визначаємо за формулою (4.91):

$$\xi = 1 / \{ \beta + [1 + 5(\delta + \lambda)] / (10\mu\alpha_s) \} = 1 / \{ 1,8 + [1 + 5 \times (0,1316 + 0,01)] / (10 \times 0,0151 \times 5,55) \} = 0,26;$$

$$\text{при } \delta = M_{\text{red}(1-1)} / (bh_0^2 f_{ck,prism}) = 12,928 \times 10^5 / (9,9 \times 18,5^2 \times 2900) = 0,1316,$$

де $M_{\text{red}(1-1)}$ – момент в перерізі (1-1), який проходить поблизу місць обриву додаткової поздовжньої арматури, при дії на середині прольоту балки згинального моменту $M_{\text{red}}=27,15 \text{ кН}\times\text{м}$, визначаємо за формулою:

$$M_{\text{red}(1-1)} = M_{\text{red}} \times x_A / c = 27,15 \times 0,3 / 0,63 = 12,928 \text{ кН}\times\text{м}.$$

Визначаємо значення міцності на згин балки перерізах (1-1) поблизу місць обриву додаткової арматури, за умови досягнення в крайньому волокні основної поздовжньої арматури напруження границі текучості $\sigma_s = f_{yk}(\sigma_T) = 400 \text{ МПа}$:

$$M_{\text{red}} = \gamma_u f_{yk}(\sigma_T) A_s z c / (k_\sigma x_A) = 0,9 \times 40000 \times 3,08 \times 16,11 \times 63 / (1,6 \times 30) = \\ = 2344488,3 \text{ Н}\times\text{см} = 23,44 \text{ кН}\times\text{м}.$$

Так, як $M_{\text{red}} = 23,44 \text{ кН}\times\text{м} > M_{\text{експл}(1-1)} = 21,18 \times 0,3 / 0,63 = 10,09 \text{ кН}\times\text{м}$, міцність на згин залізобетонної балки в перерізах (1-1) буде достатньою для сприйняття згинального моменту максимальної величини $M_{\text{експл}} = 21,18 \text{ кН}\times\text{м}$, який діє в перерізі (2-2) на середині її прогону.

Висновок: міцність на згин залізобетонної балки, яка підсилюється під навантаженням шляхом нарощування перерізів в розтягувальній зоні за допомогою додаткових арматурних стержнів, які з'єднуються з існуючою

поздовжньою арматурою зварними швами, буде забезпечена при дії на неї згинального моменту максимальної величини $M_{\text{експл}}=21,18 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

4.6 Висновок за четвертим розділом по результатам впровадження практичних методів з проектування конструктивних елементів підсилення балкових залізобетонних елементів перекриттів шляхом нарощування їх перерізів

В четвертому розділі роботи приведені практичні приклади застосування методик з підсилення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів (покриття) шляхом нарощування їх перерізів, впровадження яких в практику проектування дозволить ефективно вирішувати конструктивні задачі, пов'язані з ремонтом, реконструкцією чи відновленням будівель та споруд.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу наукових досліджень та нормативної документації встановлено, що при наявності чисельних наукових робіт, які присвячені підсиленню залізобетонних балкових і плитних елементів, гібридному методу їх підсилення шляхом нарощування перерізів одночасно у нижній і верхній їх зонах присвячено недостатня кількість досліджень. Окремі наукові дослідження з підсилення перерізів залізобетонних балкових і плитних елементів показали значну ефективність вище зазначеного гібридного методу їх підсилення в порівнянні з іншими методами підсилення, так як він поєднує в собі два і більше технологічні способи і конструктивні підходи. Було встановлено, що гібридний метод зміцнення залізобетонних плитних елементів порівняно з їх індивідуальними схемами зміцнення збільшує їх несучу здатність на згин більш ніж на 100...120% без зниження їх пластичних властивостей, коли ж їх зміцнення за індивідуальними способами підсилення (тільки на рівні нижньої чи верхньої площини, або з одного чи двох боків перерізу) дозволяє підвищити міцність на згин тільки на 40...60% в порівнянні з еталонним конструктивним елементом. Тому для широкого запровадження в практику проектування способу підсиленню залізобетонних балкових і плитних елементів шляхом одночасного нарощування перерізів в стисненій і розтягнутій зонах необхідно виконати вдосконалення методик їх розрахунку, які б дозволили б визначати ефективні параметри раціонального армування і товщини шару нарощування залежно від: висоти перерізу елементу; величини розрахункового прогону; класу бетону додаткового шару набетонування; наявної площі армування залізобетонного елементу, що підсилюється.

2. Запропонована класифікація варіантів способів підсилення (відновлення) балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів, яка була сформована на основі аналізу положень діючої нормативної документації та типових конструктивних рішень, котрі висвітлені в практичних рекомендаціях та наукових дослідженнях науковців світу.

3. Розроблені методи розрахунку міцності на згин балкових і плитних конструктивних елементів залізобетонних перекриттів, які підсилені шляхом нарощування перерізів, а саме:

- метод розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу за допомогою додаткових арматурних стержнів, які закріплюються (з'єднуються) до стержнів існуючого армування завдяки переривистих зварних швів. Методика розрахунку міцності на згин залізобетонних балок, які армовані додатковою поздовжньою арматурою під час навантаження, дозволяє визначити: площу раціонального (оптимального) поздовжнього армування їх перерізів; місце (положення) оптимального зварювання арматурних стрижнів, які використовуються для посилення перерізів балок у розтягнутій зоні;
- метод розрахунку міцності на згин комбінованих Т-подібних перерізів балкових і плитних елементів залізобетонних перекриттів, які підсилені шляхом улаштування в них додаткового залізобетонного шару набетонування в зоні стиску та додаткового армування в зоні розтягу. Метод розрахунку забезпечує необхідну міцність у розрахункових комбінованих перерізах балково-плитних елементів монолітного залізобетонного перекриття та перекриттів із збірних залізобетонних ребристих плит чи плоских плит з круглими пустотами при згині, а також дозволяє ефективно розраховувати раціональні перерізи конструктивних компонентів підсилення, враховуючи наявне в них армування;
- методика розрахунку міцності на згин комбінованих залізобетонних балкових елементів, які утворюються в результаті їх підсилення шляхом двобічного симетричного нарощування їх перерізів. Дана методика базується на методі розрахункового опору залізобетону, який ґрунтується на універсальній функціональній залежності $k_z = f(\omega)$ міцносних характеристик залізобетонного конструктивного елементу, що згинається. За допомогою представлених в п.2.4 аналітичних залежностей маємо можливість виконати

рішення двох типів задач: задачі типу 1: визначення необхідної площі армування в нижній розтягувальній зоні додаткових бокових бетонних шарів набетонування перерізу в комбінованій балці, яка утворюється в результаті підсилення перерізів існуючої залізобетонної балки шляхом їх нарощуванням по всій висоті додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням; задачі типу 2: визначення міцності на згин комбінованої балки, яка утворюється в результаті підсилення перерізів по всій висоті існуючої залізобетонної балки додатковим двошаровим симетричним бічним набетонуванням.

4. Проведені експериментальні досліджень зварених внакладку окремих поздовжніх арматурних стержнів складеного перерізу з різними конструктивними рішеннями, які утворюються при підсиленні залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу в розтягненій зоні, дозволили визначити вплив різних факторів на їх міцність на розтяг, деформативність та характер розподілу внутрішніх зусиль по їх довжині при дії зовнішнього зусилля, яке моделює стадію позацентрового розтягу робочої арматури в нижній зоні перерізів балкових елементів при згині чи при застосуванні в них попереднього напруження. Отримані в результаті експериментальних досліджень величини коефіцієнтів зниження міцності на розтяг перерізів (γ_{sy}) та концентрації напруження (K_{sy}) маємо можливість застосовувати в методиці розрахунку міцності на згин залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу за допомогою додаткових арматурних стержнів, які закріплюються (з'єднуються) до стержнів існуючого армування завдяки переривистих зварних швів.

5. Запропоновані практичні методи розрахунку і проектування конструктивних елементів з підсилення балкових і плитних елементів залізобетонних перекриттів, яке здійснюється шляхом нарощування їх перерізів, що працюють на згин. Приведені приклади з підсилення балкових і плитних конструктивних елементів найбільш поширених залізобетонних міжповерхових перекриттів, які були застосовані при будівництві нині існуючих

багатоповерхових будівель і споруд, а саме: перекриття із збірних залізобетонних багатопустотних плит; монолітного балкового залізобетонного перекриття; перекриття із збірних ребристих плит; окремих балкових залізобетонних елементів. Встановлено, що метод підсилення залізобетонних балкових і плитних конструктивних елементів перекриттів шляхом нарощування перерізів одночасно в стисненій і розтягувальній зонах є найбільш раціональним в порівнянні з іншими методами і способами, так як він при мінімальних витратах матеріалів за рахунок збільшення міцності бетону в стисненій зоні і величини відстані (“плеча”) між внутрішніми рівнодійними зусиллями в комбінованому їх перерізі дозволяє значно збільшити їх несучу здатність на згин в перерізах на середині їх прогону, де діють згинальні моменти максимальної величини. Впровадження в проектну практику запропонованих методик з підсилення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів (покриття) шляхом нарощування їх перерізів дозволить ефективно вирішувати конструктивні задачі, пов'язані з їх посиленням під час ремонту, реконструкції чи відновленні будівель та споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН Б В.3.1-2:2016 Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. [Текст]: Наказ Мінрегіону від 24.06.2016 №182, чинний з 2017-04-01. – К.: ДП "УкрНДНЦ", 2017. – 72 с.
2. Strengthening method of beam column slab component. Shanghai Horse Construction Co., Ltd. (HORSE Construction): 501, №.10, Lane 1228 Jiangchang Rd, Shanghai, China. <https://www.horseen.com/solution/strengthening-method-beam-column-slab-component>
3. Римар Я. В. Міцність та деформативність залізобетонних балок, підсилених під навантаженням нарощуванням арматури: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди / Ярослав Васильович Римар; Національний університет "Львівська політехніка". Львів, 2010. – 20 с. Бібліографія: с. 16–17 (10 назв). <https://ena.lpnu.ua/items/c9bb0ff1-f732-46a4-b437-442074daf15f>
4. Бліхарський З.Я. Експериментальні дослідження залізобетонних балок, підсилених нарощуванням арматури / З.Я. Бліхарський, Я.В. Римар // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Збірник наук. праць НУВГП. Випуск 13 – Рівне: НУВГП.– 2005.– С. 346-351.
5. Бліхарський З.Я. Підсилення залізобетонних балок нарощуванням арматури під навантаженням / З.Я. Бліхарський, Я.В. Римар // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Збірник наук. праць НУВГП. Випуск 14. – Рівне: НУВГП.– 2006.– С. 449-454.
6. Бліхарський З.Я. Залізобетонні балки, підсилені нарощуванням арматури під навантаженням / З.Я. Бліхарський, Я.В. Римар, Р.Є. Хміль // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Теорія і практика будівництва*.- Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005.- №545. - С. 15–19. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/47302>
7. Бліхарський З. Я. Методика експериментального дослідження міцності нормальних перетинів залізобетонних балок, підсилених додатковою попередньо напруженою арматурою під навантаженням / З. Я. Бліхарський, Р. Є. Хміль, Я. В. Римар, Б. М. Ковальчук, Р. Ю. Титаренко // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*.- 2015.- № 823.- С.21-26. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2015_823_6
8. Міцність залізобетонних балок, підсилених попередньо напруженою арматурою / Б. М. Ковальчук, Я. В. Римар, З. Я. Бліхарський, П. Ф. Холод // *Вісник національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва*. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. - № 877. - С. 109–114. <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/44184>

9. Боярчук Б. А. Міцність, тріщиностійкість та деформативність залізобетонних конструкцій при різних способах підсилення розтягнутої зони: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Б. А. Боярчук. – Луцьк, 2003. – 157 с.
10. Gul A., Alam B., Khan F. A., Badrashi Y. I., & Shahzada K. (2015) Strengthening and evaluation of reinforced concrete beams for flexure by using external steel reinforcements / *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, April 2015, vol.4 (№4), pp. 260–263. <https://doi.org/10.17950/ijset/v4s4/409>
11. Hosen, M.A., et al. Flexural strengthening of RC beams with NSM steel bars / *International Conference on Food, Agriculture and Biology*, pp. 8–13, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.15242/IICBE.C61451>
12. Hosen, M. A., Jumaat, M. Z., Alengaram, U. J., Islam, A. B. M. S., & Bin Hashim, H. (2016). Near Surface Mounted Composites for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams. *Polymers*, 8(3), 67. <https://doi.org/10.3390/polym8030067>
13. Al-Ameedee, H.S.; Al-Khafaji, H.M. Improving the flexural behavior of RC beams strengthening by near-surface mounting. *J. Mech. Behav. Mater.* 2022, 31, 701–709. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0070>
14. Jung, W.T.; Park, J.S.; Kang, J.Y.; Keum, M.S. (2017) Flexural Behavior of Concrete Beam Strengthened by Near-Surface Mounted CFRP Reinforcement Using Equivalent Section Model. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017, 9180624. <https://doi.org/10.1155/2017/9180624>
15. Jung, W.T.; Park, Y.H.; Park, J.S.; Kang, J.Y.; You, Y.J. Experimental Investigation on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened by NSM CFRP Reinforcements. In *Proceedings of the SP-230: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, Kansas City, MI, USA, 6–9 November 2005; pp. 795–806. <https://quakewrap.com/frp%20papers/ExperimentalInvestigationonFlexuralBehaviorofRCBeamsStrengthenedbyNSMCFRPReinforcement.pdf>
16. Xing G, Chang Z, Ozbulut OE. Behavior and failure modes of reinforced concrete beams strengthened with NSM GFRP or aluminum alloy bars. *Structural Concrete*. 2018; 1–13. <https://doi.org/10.1002/suco.201700099>
17. Abdallah, M., Al Mahmoud, F., Tabet-Derraz, M.I., et al. Experimental and numerical investigation on the effectiveness of NSM and side-NSM CFRP bars for strengthening continuous twospan RC beams / *Journal of Building Engineering*, v. 41, pp. 102723, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102723>
18. De Lorenzis, L., Nanni A. and La Tegola A., Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods / *International Meeting on Composite Materials*, PLAST 2000, Milan, Italy, May 9-11, 2000. - 8 p. <https://www.researchgate.net/publication/237445610>

19. Kálmán Szabó, Z. and L. Balázs, G. Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures / *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 51(1), pp. 33–38, 2007. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2007-1.05>
20. Pour A.K., Karami M. and Karakouzian M. Enhancing Flexural Strength of RC Beams with Different Steel–Glass Fiber-Reinforced Polymer Composite Laminate Configurations: Experimental and Analytical Approach. *Infrastructures* 2024, 9, 73. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9040073>
21. Taha, S., Iskander, G., Abou-Zeid, M. and Sayed-Ahmed, E. (2024) “Examining ACI Development Length and Strength Provisions for RC Slabs Strengthened with NSM GFRP”, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 24(2), pp. 1–5. doi: 10.56748/ejse.24506. <https://doi.org/10.56748/ejse.24506>
22. Oudah, F. and El-HachA, R. Non-linear finite element modeling of RC beams strengthened using prestressed NSM CFRP rods under cyclic loading / In: Conference: The 6th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS, 2012), Kingston, Ontario, Canada, 22–25 May 2012.- 17 p. <https://www.researchgate.net/publication/282740810>
23. Adel, B., et al. Modeling of CFRP strengthened RC beams using the SNSM technique, proposed as an alternative to NSM and EBR techniques / *Frattura ed Integrità Strutturale*, v. 14, n. 54, pp. 21–35, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.3221/IGF-ESIS.54.02>
24. Alkhateeb M.Y., Hejazi F. (2022) Reinforced concrete beams externally strengthened by CFRP rods with steel plate, anchorage bolts, and concrete jacketing. *Structures*, 46, pp. 1994–2013, 10.1016/j.istruc.2022.11.024 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012422010633>
25. Oudah, F. and El-Hacha, R. (2012). Anchorage performance of RC beams strengthened using prestressed NSM CFRP under fatigue and post-fatigue monotonic loadings. The 4th Bond in Concrete (BIC), Brescia, Italy, June 17-20. https://www.researchgate.net/publication/270275274_Anchorage_performance_of_RC_beams_strengthened_using_prestressed_NSM_CFRP_under_fatigue_and_post-fatigue_monotonic_loadings
26. Effiong J.U. and Ede A.N. (2022) Experimental Investigation on the Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Bonded and Near-Surface Mounted Natural Fibre Reinforced Polymer Composites - A Review. *Materials*, 15(17), 5848. <https://doi.org/10.3390/ma15175848>
27. Abdullah, A.H. and Kadir, D.R.A. (2016) NSM FRP reinforcement for strengthening reinforced concrete beams-overview / *ZJPAS*, 28(2), pp. 178-200. <https://www.researchgate.net/publication/308679692>
28. Dias, S.J.E., Silva, J.R.M., Barros, J.A.O. (2020) Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams with a hybrid cfrp solution, *Composite Structures*, vol. 256, 113004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113004>

29. Soror, A. Y., et al. State of the Art Review: Flexural Strengthening of Reinforced and Pre-Stressed Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymers. *Engineering Research Journal*, vol. 42, no. 2, Apr. 2019. https://www.researchgate.net/publication/333247709_State_of_the_art_review_Flexural_Strengthening_of_reinforced_and_prestressed_concrete_beams_using_Fiber_reinforced_polymers_Alcohol
30. Бамбура А. М., Сазонова І. Р., Собко Ю. М. (2014) Підсилення залізобетонних конструкцій композитними матеріалами фірми Sika / *Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Серія: Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового та транспортного призначення*. Вип. 77. С. 8-12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmmit_2014_77_3.
31. Al-Amery, R., & Al-Mahaidi, R. (2006). Coupled flexural–shear retrofitting of RC beams using CFRP straps. *Composite Structures*, 75(1–4), 457–464. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.037>
32. Фірсов П.М., Каафарані Башар Алі (2022) Методика розрахунку підсилення залізобетонних балочних елементів системою композитних матеріалів. *Науковий вісник будівництва*. т. 108, №2.- С. 36-43. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/uk/article/view/15>
33. Мурин А. Я. Міцність, жорсткість і тріщиностійкість залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Львів, 2011. – 19 с.
34. Борисюк О.П., Конончук О.П. (2012) Міцність, жорсткість та тріщиностійкість нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава: НТУ. – Вип. 2 (32), Т.2. – С.3-10.
35. Борисюк О.П., Конончук О.П. Напружено-деформований стан нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів, підсилених вуглепластиками за дії малоциклового навантаження. Монографія. – Рівне: НУВГП, 2014. – 136 с.
36. Бабич Є. М., Довбенко В. С. (2013) Підвищення міцності залізобетонних балок полімерною композицією. *Збірник наукових праць: Галузеве машинобудування, будівництво*. Вип. 4(1). С. 11-19. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2013_4\(1\)_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2013_4(1)_4)
37. Чеканович М.Г., Чеканович О.М., Журахівський В.П. (2014). Міцність сталезалізобетонних балок, підсилених важільно-стрижневою системою. *Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво*, 3(42), 227-231 https://znp.nupp.edu.ua/files/archive/ua/2014/42_1/227-231.pdf
38. Chekanovych M. (2023). Stress-Strain state of reinforced concrete beams strengthened with a flexible rod-roller system. *AIP Conf. Proc.* 2949, 020004. <https://doi.org/10.1063/5.0165276>

39. Zhyrakhivskiy, V. P., Chekanovych M. G., & Chekanovych O. M. (2017). напружено-деформований стан залізобетонних балок, підсилених новою зовнішньою сталевую конструкцією. *Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво*, 1(48), 90-99. <https://doi.org/10.26906/znp.2017.48.782>
40. Chekanovych, M. G., Romanenko, S. M., & Andrievska, Y. P. (2017). Ефективна схема підсилення залізобетонних балок. *Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво*, 1(48), 81-89. <https://doi.org/10.26906/znp.2017.48.781>
41. Чеканович М.Г., Чеканович О.М. (2010) Дослідження роботи конструкції підсилення залізобетонних балок, виконаної у вигляді взаємопов'язаних затяжки та розтяжки. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції та споруди: збірник наукових праць*. – Рівне, вип. 20. – С. 506-512.
42. Чеканович М.Г., Романенко С.М., Андрієвська Я.П. (2018) Система зовнішнього підсилення залізобетонних згинальних елементів і моделювання її роботи. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції та споруди: збірник наукових праць*. – Рівне, вип. 36. – С. 506-512. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i36.295>
43. Чеканович М.Г. (2022) Метод попереднього напруження залізобетонних конструкцій, що підвищує їх міцність. *Таврійський науковий вісник: технічні науки*, №2. – С.57-62. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.2.8>
44. Li, Ling-Zhi; Jiang, Chang-Jiu; Su, Ray Kai-Leung, & Lo, Sai-Huen. (2017). A piecewise linear transverse shear transfer model for bolted side-plated beams. *Structural Engineering and Mechanics*, 62(4), 443–453. <https://doi.org/10.12989/SEM.2017.62.4.443>
45. Liu, X., Lu, Z.-D., & Li, L.-Z. (2018). The Use of Bolted Side Plates for Shear Strengthening of RC Beams: A Review. *Sustainability*, 10 (12), 4658. <https://doi.org/10.3390/su10124658>
46. Li, L.-Z., Liu, X., Luo, Y., Su, M.-N., and Zhu, J.-H. (2019a). Flexural Performance of Bolted-Side-Plated Reinforced Concrete Beams with Buckling Restraining. *ACI Struct. J.*, 116 (2), 1–12, 10.14359/51712277. <https://www.researchgate.net/publication/330060142>
47. Liu, X., Chen, Y., Li, L.-Z., Su, M.-N., Lu, Z.-D., & Yu, K.-Q. (2019). Experimental Study on the Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Bolted Side-Plating. *Sustainability*, 11(9), 2465. <https://doi.org/10.3390/su11092465>
48. Kim, M.S.; Lee, Y.H. (2021) Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Modularized Steel Plates. *Appl. Sci.* 2021, 11, 2348. <https://doi.org/10.3390/app11052348>
49. Huang Y. et al. (2022) Strengthening of concrete structures with ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): A critical review. *Construction*

- and Building Materials*, 336, 127398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127398>
50. Saeed, F.H.; Hejazi, F. A. (2025) Comprehensive Review of Retrofitted Reinforced Concrete Members Utilizing Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*, 18, 945. <https://doi.org/10.3390/ma18050945>
 51. Hammad, M., Bahrami, A., Khokhar, S. A., & Khushnood, R. A. (2024). A State-of-the-Art Review on Structural Strengthening Techniques with FRPs: Effectiveness, Shortcomings, and Future Research Directions. *Materials*, 17(6), 1408. <https://doi.org/10.3390/ma17061408>
 52. Osman, B.H., Wu, E., Ji, B. et al. A state of the art review on reinforced concrete beams with openings retrofitted with FRP. *Int J Adv Struct Eng* 8, 253–267 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40091-016-0128-7>
 53. Frhaan, W.K.M., Abu Bakar, B.H., Hilal, N. et al. (2021) CFRP for strengthening and repairing reinforced concrete: a review. *Innov. Infrastruct. Solut.* 6, 49. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00417-5>
 54. Siddika, Ayesha, Al Mamun, Md. Abdullah, Ferdous, Wahid and Alyousef, Rayed. (2020) Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*. 111, pp. 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104480>
 55. Ahmed, F.B.; Biswas, R.K.; Sen, D.; Tasnim, S. (2024) Flexural and Shear Strengthening of Reinforced-Concrete Beams with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *Constr. Mater.*, 4, 468–492. <https://doi.org/10.3390/constrmater4020025>
 56. Zhu, Y.; Zhang, Y.; Hussein, H.H.; Chen, G. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams or Slabs Using Ultra-High Performance Concrete (UHPC): A State of the Art Review. *Eng. Struct.* 2020, 205, 110035. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110035>
 57. Abbas HM, Kadhim MM. Review of Behavior Flexural Strengthened RC Beams Using Ultra-High Performance Concrete. *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias* [Internet]. 2024 Jan. 1 [cited 2025 Mar. 7]; 3:854. Available from: <https://conferencias.ageditor.ar/index.php/sctconf/article/view/918>
 58. Mand, K.A., Ali, F.H., Yaman, S.S.A, “Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: a state of the art”, *Case Studies in Construction Materials*, v. 17, pp. e01189, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01189>
 59. Mostosi, S., Beschi, C., Meda, A., & Riva, P. (2017). Experimental and analytical behaviour of RC members strengthened by means of a high-performance jacket. *Fib Bulletin* 79. *Fibre-Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications*, 203–212. <https://doi.org/10.35789/fib.bull.0079.ch20>

60. Meda, A., Mostosi, S., & Riva, P. (2014). Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beam with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Jacketing. *ACI Structural Journal*, 111(5). <https://doi.org/10.14359/51686807>
61. Lampropoulos, A. P., Paschalis, S. A., Tsioulou, O. T., & Dritsos, S. E. (2016). Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Engineering Structures*, 106, 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.042>
62. Lampropoulos, A. P., Paschalis, S. A., Tsioulou, O. T., & Dritsos, S. E. (2015). Strengthening of existing reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV*, 124–125. <https://doi.org/10.1201/b18972-80>
63. Al-Osta, M. A., Isa, M. N., Baluch, M. H., & Rahman, M. K. (2017). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 134, 279–296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094>
64. Safdar, M., Matsumoto, T., & Kakuma, K. (2016). Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Composite Structures*, 157, 448–460. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.010>
65. Hassanean, Yehia. A., Assaf, K. A., Abdel Raheem, S. E., & Arafa, A. N. (2012). Behavior of repaired r.c. beams by using steel fiber concrete jacket and subjected to short time repeated loading. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 40(5), 1309–1324. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2012.112111>
66. Prem, P.R., Ramachandra Murthy, A., Ramesh, G., Bharatkumar, B.H., Iyer, N.R. (2015). Flexural Behaviour of Damaged RC Beams Strengthened with Ultra High Performance Concrete. In: Matsagar, V. (eds) *Advances in Structural Engineering*. Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2187-6_158
67. Hussein, L., & Amleh, L. (2018). Size effect of ultra-high performance fiber reinforced concrete composite beams in shear. *Structural Concrete*, 19(1), 141–151. Portico. <https://doi.org/10.1002/suco.201700078>
68. Zhu, Z., Abdelbaset, H., Li, X., & Tang, Q. (2023). Flexural behavior of long-term loaded RC beams strengthened by ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 407, 133428. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133428>
69. Prem, P. R., & Murthy, A. R. (2016). Acoustic emission and flexural behaviour of RC beams strengthened with UHPC overlay. *Construction and Building Materials*, 123, 481–492. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.033>
70. Ahmed, F.B.; Biswas, R.K.; Sen, D.; Tasnim, S. Flexural and Shear Strengthening of Reinforced-Concrete Beams with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *Constr. Mater.* 2024, 4, 468–492. <https://doi.org/10.3390/constrmater4020025>

71. Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H. H., & Chen, G. (2020). Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review. *Engineering Structures*, 205, 110035. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110035>
72. Abbas HM, Kadhim MM. Review of Behavior Flexural Strengthened RC Beams Using Ultra-High Performance Concrete. *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias* [Internet]. 2024 Jan. 1 [cited 2025 Mar. 7]; 3:854. Available from: <https://conferencias.ageditor.ar/index.php/sctconf/article/view/918>
73. Mand, K.A., Ali, F.H., Yaman, S.S.A, (2022) Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: a state of the art. *Case Studies in Construction Materials*, v. 17, pp. e01189, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01189>
74. Bahij, S., Adekunle, S. K., Al-Osta, M., Ahmad, S., Al-Dulaijan, S. U., & Rahman, M. K. (2017). Numerical investigation of the shear behavior of reinforced ultra-high-performance concrete beams. *Structural Concrete*, 19(1), 305–317. Portico. <https://doi.org/10.1002/suco.201700062>
75. Abadel, A. A. (2025). Experimental and numerical study on flexural enhancement of reinforced self-compacting concrete beams through various strengthening approaches. *Advances in Structural Engineering*, 28(13), 2463–2487. <https://doi.org/10.1177/13694332251334839>
76. Tayeh, B. A., Abu Maraq, M. A., & Ziara, M. M. (2020). Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with self-compacting concrete jacketing and steel welded wire mesh. *Structures*, 28, 2146–2162. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.035>
77. Zhang, X., Luo, Y., Wang, L., Zhang, J., Wu, W., & Yang, C. (2018). Flexural strengthening of damaged RC T-beams using self-compacting concrete jacketing under different sustaining load. *Construction and Building Materials*, 172, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.245>
78. Li, W., Huang, X., Liu, X., Wen, T., Jing, C., & Li, L. (2024). Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with a Novel High-Strength and High-Toughness Epoxy Mortar Thin Layer. *Applied Sciences*, 14(10), 3999. <https://doi.org/10.3390/app14103999>
79. Alhadid, M. M. A., & Youssef, M. A. (2017). Analysis of reinforced concrete beams strengthened using concrete jackets. *Engineering Structures*, 132, 172–187. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.014>
80. Alhadid, M. M. A., & Youssef, M. A. (2018). Assessment of the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with concrete jackets. *Engineering Structures*, 167, 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.026>
81. Alkhateeb, M. Y., & Hejazi, F. (2024). Strengthening Reinforced Concrete Beams through Integration of CFRP Bars, Mechanical Anchorage System, and Concrete Jacketing. *Materials*, 17(12), 2794. <https://doi.org/10.3390/ma17122794>

82. M. Monir Ajan Alhadid and Maged A. Youssef (2015) Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Beams Using Concrete Jackets. *PROTECT2015 Conference on Response of Structures under Extreme Loading*. - p.9. https://www.researchgate.net/publication/279751877_Title_Strengthening_and_Repair_of_Reinforced_Concrete_Beams_Using_Concrete_Jackets
83. Silva R. J. C., Muniz M. B. S., da Silva Júnior F. E. S., Lima É. M. F., dos S. Araújo C. V. (2019) Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened with steel bars and epoxy structural adhesive. *Revista ALCONPAT*, 9 (1), pp. 65-78. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.213>
84. Alper Büyükkaragöz (2010) Finite element analysis of the beam strengthened with prefabricated reinforced concrete plate. *Scientific Research and Essays*. vol. 5(6). pp. 533-544. <https://doi.org/10.5897/SRE.9000505>
85. Khan, M.I., Abbas, Y.M. (2023) Behavioral Evaluation of Strengthened Reinforced Concrete Beams with Ultra-Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composite Layers. *Materials*, 16, 4695. <https://doi.org/10.3390/ma16134695>
86. Bandar F. Al-Harbi, Dr. Gamal A. Al-Saadi, Dr. Ahmed F. Elragi. (2018) Effect of Configurations of Partial Concrete Jacketing on Behavior of Strengthened Beam. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* 9(10), pp. 600–610. <https://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=9&Issue=10>
87. Xing, G., Wu, T., Liu, B. (2010) Experimental investigation of reinforced concrete T-beams strengthened with steel wire mesh embedded in polymer mortar overlay. *Advances in Structural Engineering*, 13(1), 69-79. <http://dx.doi.org/10.1260/1369-4332.13.1.69>.
88. Chen S., Zhang K., Cao D., et al. (2025) Simulation of RC-T beam reinforced by steel wire mesh and polyurethane cement composite (SWM-PUC), *Civil Eng. J.* 34 (1) 80–100, <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-034-01-06>.
89. Abd El Malik Shehata, I., da Conceição Domingues Shehata, L., Wagner Freitas Santos, E., & de Faria Simões, M. L. (2008). Strengthening of reinforced concrete beams in flexure by partial jacketing. *Materials and Structures*, 42(4), 495–504. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9397-3>
90. Abu Maraq, M. A., Tayeh, B. A., Ziara, M. M., & Alyousef, R. (2021). Flexural behavior of RC beams strengthened with steel wire mesh and self-compacting concrete jacketing — experimental investigation and test results. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 1002–1019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.069>
91. Tayeh, B. A., Abu Maraq, M. A., Ziara, M. M., & Shihada, S. (2020). Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with side and bottom concrete layers. *Results in Engineering*, 8, 100189. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100189>

92. Li, C., & Aoude, H. (2023). Effect of UHPC jacketing on the shear and flexural behaviour of high-strength concrete beams. *Structures*, 51, 1972–1996. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.104>
93. Мазурак А., Барабаш В. (2008) Використання торкрет-бетону при підсиленні бетонних та залізобетонних конструкцій / *Дороги і мости*. Вип. 10. С. 172–176. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim_2008_10_30.
94. Roman Kinasz et al (2020) Bearing capacity of strengthened reinforced concrete beams. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 960 022047. https://www.researchgate.net/publication/347539710_Bearing_Capacity_of_Strengthened_Reinforced_Concrete_Beams
95. Bearing capacity of strengthened reinforced concrete beams / A. V. Mazurak, I. V. Kovalyk, V. O. Mehaylechko, M. V. Sadovyi, P. Ambroziak // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. – 2014. – № 781: Теорія і практика будівництва. – С.129–134. <https://ena.lpnu.ua/server/api/core/bitstreams/5edf6c54-c260-4372-9aaa-07e8d2881bc9/content>
96. Мазурак А. В., Калітовський А.В. (2010) Міцність і деформативність експериментальних залізобетонних балок, підсилені і виготовлені за технологією торкретування / *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. – № 664 : Теорія і практика будівництва. – С. 78–82.
97. Дубіжанський Д. І. Міцність та деформативність залізобетонних балок, посилені залізобетонною обоймою під навантаженням: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Львів, 2013. – 23 с. <https://ena.lpnu.ua/items/de389b9a-1d4f-4472-b24f-d4dfb29dce8b>
98. Бліхарський З. Я., Римар Я. В., Дубіжанський Д. І. (2007) Експериментально-теоретичні дослідження міцності залізобетонних балок, підсилені під навантаженням. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. № 600: Теорія і практика будівництва. – С. 19–22. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/35588>
99. Дубіжанський, Д. І., Хміль, Р. Є., Бліхарський, З. Я. (2012) Теоретичне визначення міцності залізобетонних балок, підсилені залізобетонною обоймою за дії навантаження за інженерною методикою. *Теорія і практика будівництва: збірник наукових праць*. Вип. №742. – С. 70–74. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/17968>
100. Бліхарський, З. Я., Хміль, Р. Є., Дубіжанський, Д. І., Васільєв, І. В. (2013) Розрахунок міцності нормальних перерізів залізо-бетонних балок, підсилені при дії навантаження, з врахуванням вимог нових норм проектування. *Будівельні конструкції*. Вип. 78(1).– С. 307–314. http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2013_78%281%29_45
101. Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F., & Faqiri, A. (2020). Structural Strengthening/Repair of Reinforced Concrete (RC) Beams by Different Fiber-Reinforced Cementitious Materials - A State-of-the-Art Review. *Journal of Civil*

- and Environmental Engineering*, 10(4). <https://doi.org/10.37421/jcde.2020.10.354>
102. Brühwiler E., Denari'e E. (2008) Rehabilitation of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete. UHPC-2008: The Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. March 05 - 07, 2008, University of Kassel, Kassel, Germany. https://www.academia.edu/109071371/Rehabilitation_of_concrete_structures_using_Ultra_High_Performance_Fibre_Reinforced_Concrete
 103. Задорожнікова І.В. Підсилення стиснутої зони, як засіб відновлення експлуатаційних якостей залізобетонних згинальних елементів : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Львів, 2006. – 20 с. <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-02/%D0%90%D0%92%D0%A2%D0%9E%D0%A0%D0%95%D0%A4%D0%95%D0%A0%D0%90%D0%A2.pdf>
 104. Задорожнікова І. В. (2014) Дослідження міцності залізобетонних балок підсилених у стиснутій зоні. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Вип. 2. С. 34-39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmr_b_2014_2_9.
 105. Tian, X., Fang, Z., & Shao, Y. (2025). Flexural Behavior and Design of Prestressed Ultrahigh-Performance Concrete Beams: Failure Mode and Ductility. *Journal of Structural Engineering*, 151(9). <https://doi.org/10.1061/jsendh.steng-13830>
 106. Зятюк Ю.Ю. Напружено-деформований стан та розрахунок залізобетонних згинальних елементів, підсилених в стиснутій і розтягнутій зонах. Дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук за спеціальністю 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний ун-т водного господарства і природокористування, Рівне, 2019. – 208 с. <https://ep3.nuwm.edu.ua/15130/1/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%97%D1%8F%D1%82%D1%8E%D0%BA%20%D0%B7%D0%B0%D1%85.pdf>
 107. Зятюк Ю.Ю. (2016) Результати експериментальних досліджень залізобетонних балок, підсилених в стиснутій і розтягнутій зонах. *Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник*. – К.: КНУБА, випуск 61. – С. 216-222. <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/2016/201661.pdf>
 108. Зятюк Ю.Ю. (2016) Робота залізобетонних балок, підсилених у стиснутій і розтягнутій зонах при дії малоциклових навантажень. *Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві*. – Луцьк: ЛНТУ, випуск 5. – С. 215-223. <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/uk/issue/view/16/15>
 109. Борисюк О.П., Зятюк Ю.Ю. (2016) Напружено-деформований стан залізобетонних балок, підсилених під навантаженням сталевібробетоном і композитами при дії малоциклових навантажень. *Ресурсоекономні*

- матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУБГП, вип. 33. - С. 298-303. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i33.174>
- 110.Kankeri, P.; Prakash, S. (2017) Efficient hybrid strengthening for precast hollow core slabs at low and high shear span to depth ratios. *Composite Structural*. 2017, 170, 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.034>
 - 111.Kankeri, P.; Prakash, S.S.; Pachalla, S.K.S. (2018) Analytical and numerical studies on hollow core slabs strengthened with hybrid FRP and overlay techniques. *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 65, №5, 535-546 <https://doi.org/10.12989/sem.2018.65.5.535>
 - 112.Foubert Steven. Flexural strengthening of prestressed hollow-core slabs using near-surface mounted (NSM) CFRP reinforcement. PhD Thesis. Faculty of Graduate Studies of The University of Manitoba. Department of Civil Engineering University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada. 2014. – p. 267. <http://hdl.handle.net/1993/23570>
 - 113.Karam M., Foubert S., El-Salakawy E. (2016) Strengthening of prestressed hollow core slabs with openings using NSM-CFRP strips. *Proc. Int. Struct. Eng. Constr.* 3(1) 147–152, <https://doi.org/10.14455/ISEC.res.2016.92>.
 - 114.Karam M., Foubert S., El-Salakawy E. (2017) Strengthening of prestressed concrete hollow-core slab openings using near-surface-mounted carbonfiber-reinforced polymer reinforcement. *PCI Journal*. 62 (4): 45-57. <https://doi.org/10.15554/pcij62.4-01>
 - 115.Pachalla S.K.S., Prakash S.S. (2017) Load resistance and failure modes of GFRP composite strengthened hollow core slabs with openings. *Mater. Struct.* 50. 1–14. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0883-8>
 - 116.Li X., Wu G., Popal M.S., Jiang J. (2018) Experimental and numerical study of hollow core slabs strengthened with mounted steel bars and prestressed steel wire ropes. *Constr. Build. Mater.* 188. 456–469, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.073>.
 - 117.Elharouney O., Elkateb M., Khalil A. (2021) Behaviour of prestressed hollow core slabs strengthened with NSM CFRP strips around openings: a finite element investigation. *Eng. Struct.* 238. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112262>
 118. EL-Khouly A.F., Nabil A., Meleka N.N. (2020) A state-of-the-art review on strengthening of reinforced concrete slabs with openings. *AlAzhar Univ. Civ. Eng. Res. Mag.* 42(3) 127–141. https://www.researchgate.net/publication/351634519_A_STATE-OF-THE-ART_REVIEW_ON_STRENGTHENING_OF_REINFORCED_CONCRETE_SLABS_WITH_OPENINGS
 119. El-Mawsly E.H., El-Kashif K.F.O., Shawky A.A., Abdalla H.A. (2022) Experimental and numerical investigation on strengthening of RC flat slabs with central opening. *Case Stud. Constr. Mater.* 16. 2–16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00974>.

120. Golham M.A., Al-Ahmed A.H.A. (2024) Strengthening of GFRP reinforced concrete slabs with openings, *J. Eng.* 30 (01). 157–172. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.01.10>.
121. Hesham O., Elkateb M., Khalil A. (2020) Behavior of prestressed hollow core slabs with openings strengthened with near surface mounted FRP strips. *AlAzhar Univ. Civ. Eng. Res. Mag.* 42 (3). 181–190. <https://www.azharcermjournal.com/CERMF2010/P20-10-15.pdf>
122. Zhuravskiy, O., Tymoshchuk, V., Zhuravska, N., Hajiyeu, M. (2022). Influence of Strengthening Flat Slab by External Prestressed Reinforcement on Deformation Characteristics of the Slab. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds) *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 181. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_42
123. Zhuravskiy, O., & Tymoshchuk, V. (2017). Розрахунок плоских залізобетонних плит, підсиленних зовнішньою напруженою арматурою. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 1(1), 193–198. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.1.2017.193-198>
124. Журавський О., Тимошук В. (2018) Розрахункова модель плоских залізобетонних плит, підсиленних зовнішньою напруженою арматурою. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. № 19. С. 41-45. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vldau_2018_19_9.
125. Журавський О., Тимошук В. (2020) Дослідження плоскої залізобетонної плити підсиленої зовнішньою напруженою арматурою. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. Вип. 7. С. 4-11. http://nbuv.gov.ua/UJRN/budktp_2020_7_3.
126. Скорук, О. (2022). Підсилення конструкцій порожнистих плит перекриття металевими балками та армованим фібробетоном. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (12), 115–125. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.115-125>
127. Kalmykov, O., Binkevych, K., Pasha, E. (2025). The specifics of the calculation of floor slabs when reinforcing them by increasing the compressed zone. *Municipal Economy of Cities*, 1(189), 193-202. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-193-202>
128. Калмиков, О., Псурцева, Н., & Бінкевич, К. (2025). Технологія підсилення пошкоджених плит перекриття шляхом нарощування стислої зони та зовнішнього армування. *Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво*, 2(65), 59-67. <https://doi.org/10.26906/znp.2025.65.4181>
129. Калмиков, О.О., Бінкевич, К.О., Паша, Є.О. (2025) Особливості розрахунку плит перекриття при їх підсиленні шляхом нарощування стиснутої зони.

- Будівництво та цивільна інженерія*, 1, 193–202. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-193-202>
130. Калмиков, О., Бінкевич, К. (2024) Експериментальне встановлення деформативності панелей перекриттів великопанельного житлового будинку після відновлення. *Науковий вісник будівництва*, 110. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.110.1.7>.
 131. Бінкевич, К., Володимиров, А., Колчанов, А. (2024). Аналіз деструкцій і методів підсилення збірних залізобетонних панелей перекриттів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 208. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308565>.
 132. Li X.H., Wu G., Popal M.S., Jiang J.B. (2018) Experimental and numerical study of hollow core slabs strengthened with mounted steel bars and prestressed steel wire ropes. *Construction and Building Materials*. 2018; 188: 456–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.073>.
 133. Журавський О. Д., Мельник І. В. (2013) Робота монолітних залізобетонних плит з постнапруженою арматурою / *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*. № 755. С. 135-138. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2013_755_27
 134. Сморкалов, Д. & Винокур, В. (2024). Методи розрахунку підсилення залізобетонних конструкцій із застосуванням попередньо напружених канатів з використанням програмних комплексів. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (15), 41–53. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.15.2024.41-53>
 135. Сморкалов Д.В., Затилюк Г.А., Винокур В.С. (2024) Підсилення монолітних залізобетонних конструкцій з використанням попередньо напружених арматурних канатів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Випуск 21. С. 224-234. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-24](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-24)
 136. Барашиков А.Я., Сунак О.П., Боярчук Б.Я. (2000) Експериментальні дослідження згинальних залізобетонних елементів, підсилених різними способами. *Зб. наук. пр. НУВГП: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди..* Вип. 5. С. 294-297.
 137. Барашиков А.Я., Валовой М.О. (2009) Розрахунок підсилених таврових залізобетонних балок за різними методиками. *Дороги і мости*. Вип. 11. С. 24-29. http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim_2009_11_6.
 138. Мазурак, А.В., Осадчук, Т.Ю., Мазурак, Т.А., Мазурак, О.Т., Давидовський, Н.Б. (2025). Підсилення залізобетонного перекриття армованим торкретбетоном. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 196-206. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-1](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-1)

139. Tytarenko, R.; Khmil, R.; Katunský, D. (2025) Calibration of the reliability-oriented new design model for reinforced concrete beams strengthened under 30 % of ULS load. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1499, 012013. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1499/1/012013/pdf>
140. Klym, A.; Blikharsky, Y.; Gunka, V.; Poliak, O.; Selejdak, J.; Blikharsky, Z. (2025) An Overview of the Main Types of Damage and the Retrofitting of Reinforced Concrete Bridges. Sustainability, 17, 2506. <https://doi.org/10.3390/su17062506>
141. Klym, A.; Blikharsky, Y.; Blikharsky, Z.; Selejdak, J.; Panchenko, O. (2025) Stress-strain state of RC beams after restoration of the compressed concrete zone. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1499, 012030. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1499/1/012030/pdf>
142. Kopyika, N.; Blikharsky, Y.; Sobko, Yu.; Khmil, R.; Blikharsky, Z. (2025) Impact of CFRP-strengthening on Crack Formation in RC Structures. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1499, 012021. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1499/1/012021/pdf>
143. Ivaneiko M.M., Khmil R.Ye., Blikharskyi Z.Ya. (2026) Approaches to calculating reinforced concrete slabs strengthened by adding a cross-section of concrete. *Modern construction and architecture*, 2026, no. 15, pp. 43-50. DOI: 10.31650/2786-6696-2026-15-43-50. <https://visnyk-odaba.org.ua/2026-15/15-5.pdf>
144. Іванейко М.М., Хміль Р.Є., Бліхарський З.Я. (2024) Підсилення залізобетонних плит перекриття нарощенням перерізу: стан проблеми та перспективи. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. (46). pp. 414-424. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.48>
145. Титаренко Р.Ю. Надійність залізобетонних балок, посиленних при дії навантаження: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Львів, 2019. – 22 с. <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1666/arefmukanov.pdf>
146. Shmukler, V., Reznik, P., Krul, Yu., Volodymyrov, A., Binkevych, K. (2024). Design features of the new system for reconstruction and renovation of large panel buildings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1376. 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012012>
147. Vatulia, G., Orel, Y., & Kovalov, M. (2014). Carrying Capacity Definition of Steel-Concrete Beams with External Reinforcement under the Fire Impact. *Applied Mechanics and Materials*, 617, 167–170. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.617.167>
148. Vatulia G. L. Lobiak O. V., Deryzemlia S. V., Verevicheva M. A., Orel Ye. F. (2019) Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering,- 664, 1-10. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/664/1/012014/pdf>

149. Воскобійник, П. П., Овсій, Д. М., Воскобійник, Є. П. (2016) Експериментальні дослідження відновлення експлуатаційних властивостей залізобетонних балок з метою їх повторного застосування. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. (32). pp. 451-458. <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/5776>
150. Бобало Т.В., Витак О.П., Якімів Д.Ю. (2026) Підсилення монолітних залізобетонних плит перекриття шляхом влаштування додаткових балок через технологічні отвори: від розрахунку до реалізації. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. (49). pp. 160-171. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i49.15>.
151. Vytak Oleh, Bobalo Taras (2025) Strengthening of reinforced concrete slabs by adding monolithic beams: methods and implementation. *Theory and Building Practice*. 2025(2): 34-44. <https://doi.org/10.23939/jtbp2025.02.034>
152. Бобало Т. В., Якимів Д. Ю. (2025) Підсилення залізобетонних плит сталевими балками із об'єднанням у сталезалізобетонну конструкцію // *Матеріали МНТК „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“*, Тернопіль, 28-29 травня 2025 року. С. 73–75. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48901>
153. Савйовський В. В., Молодід О.С., Малець Н.О. (2017) Підсилення залізобетонних балочних конструкцій зовнішнім армуванням. *Управління розвитком складних систем*. Вип. 29. С. 198-203. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2017_29_30.
154. Савйовський В. В., Молодід О.С. (2017) Дослідження особливостей підсилення залізобетонних балкових конструкцій зовнішнім армуванням. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. №4. С. 29-36. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/235>
155. Попович М.М. Миронюк О.С., Борщов В.І. (2005) Підсилення залізобетонних балкових прогінних будов з використанням шпренгелів і попередньо напружених стрижнів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Вип. 6. С. 131-132. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2005_6_26
156. Постернак О.М., Постернак М.М. (2016) Раціональний вибір підсилення залізобетонних балок з врахуванням надійності. *Містобудування та територіальне планування*. Вип. 61. С.450-455. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_58
157. Валовой О.І., Ерьоменко О.Ю. (2008) Оцінки міцності залізобетонних балок, підсилених в стиснутій зоні ефективними матеріалами. *Дороги і мости*. вип. 9. 22-28. https://dorogimosti.org.ua/files/upload/Zu_6.pdf
158. Валовой О.І., Попруга Д.В. (2015) Сучасні матеріали для підсилення залізобетонних згинальних елементів. *Ресурсоекономні матеріали*,

- конструкції, будівлі та споруди.* (31). С. 401-407. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i31.40>
- 159.ДБН В.2.6-98:2009 зі Зміною №1. Бетонні і залізобетонні конструкції. Основні положення / Наказ Мінрегіонбуду України від 24.12.2009 р. № 680, введені в дію з 01.07.2011 р., зміни чинні з 01.06.2020 р. – К.: Мінрегіон України, 2020.– 71 с.
 - 160.ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2 із Зміною №1. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1992-1-1:2004, IDT) / Накази Мінрегіонбуду України № 549 від 27.12.2010 р. та № 634 від 30.12.2013 р., чинний з 1 липня 2014 р. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 167 с.
 - 161.Kochkarev D., Galinska T. (2017) Calculation methodology of reinforced concrete elements based on calculated resistance of reinforced concrete. *MATEC Web of Conferences*. 116, 02020. pp.1-9. DOI: 10.1051/matecconf/201711602020. https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/30/matecconf_tr2017_02020.pdf
 - 162.ДБН В.2.6-198:2014 зі Зміною №1. Сталеві конструкції. Норми проектування / Наказ Мінрегіону України від 10.06.2014 р. №167, чинні з 01.01.2015 р. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 205 с.
 - 163.ДСТУ Б В.2.6-216:2016 Розрахунок і конструювання з'єднувальних елементів сталезалізобетонних конструкцій / Наказ Мінрегіону України від 24.06.2016 р. №181, чинні з 01.04.2017 р. – К.: Мінрегіон України, 2016. – 46 с.
 - 164.ДБН В.2.2-5:2023 зі Зміною №1. Захисні споруди цивільного захисту / Накази Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 10.08.2023 року №702 та 10.10.2023 року №921, чинні з 2023-11-01. – К.: Мінінфраструктури України, 2023. – 131 с.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

ДОДАТОК А.1 Список публікацій здобувача за темою дисертації

Публікації у наукових періодичних виданнях, включених до категорії “Б” Переліку наукових фахових видань України:

1. Азізова, А.Г., Овсій, О.М., Овсій, Д.М., Стрюк Р.І. (2025). Підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні. *Нові технології в будівництві: Науково-технічний журнал.* №46 // Київ, НДІБВ. – 2025. – С. 3-15. <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2025.46.1>

(Особистий внесок: запропоновано методичні основи розрахунку міцності на згин і проектування підсилення збірних залізобетонних ребристих плит перекриття шляхом нарощування перерізу додатковими залізобетонним шаром в стиснутій зоні та армуванням в розтягнутій зоні у вигляді шпренгельної затяжки)

2. Азізова, А.Г., Пенц, М.В., Овсій, Д.М., Гасенко, А.В. (2025). Конструктивні рішення з відновлення вбудованих приміщень споруд подвійного призначення в будівлях закладів освіти із стіновою конструктивною системою. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 20-39. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-02)

(Особистий внесок: запропонована класифікація варіантів способів підсилення (відновлення) балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів перекриттів будівель і споруд шляхом нарощування їх перерізів)

3. Azizova, A., Ovsii, D., Semko, O., & Ovsii, M. (2025). Strength and force distribution of lap-welded composite longitudinal reinforcing bars formed during strengthening of reinforced concrete beam elements by increasing the cross-section in the tension zone. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(64), 39–54. <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4136>

(Особистий внесок: наведені результати експериментальних досліджень зразків із зварених внакладку окремих поздовжніх арматурних стержнів складеного перерізу з різними конструктивними рішеннями, які утворюються при підсиленні залізобетонних балкових елементів шляхом нарощування перерізу в розтягнутій зоні, які дозволили визначити вплив різних факторів на їх міцність на розтяг, деформативність та характер розподілу внутрішніх зусиль по їх довжині при дії зовнішнього зусилля, яке моделює стадію позацинтового розтягу робочої арматури в нижній зоні перерізів балкових елементів при згині чи при застосуванні в них попереднього напруження)

4. Azizova A., & Ovsii D. (2026). Methods of strengthening and repairing reinforced concrete beam and slab elements by increasing their cross-sections: a review and directions for further scientific research. *Academic Journal. Industrial Machine, Building Civil Engineering*, 1(66), 19-34. <https://doi.org/10.26906/znp.2026.66.4667>
(Особистий внесок: проведено аналіз наукових досліджень та нормативної

документації, які присвячені підсиленню залізобетонних балкових і плитних елементів, на основі якого були сформовані мета і задачі наукових досліджень, що були проведені в дисертаційній роботі)

Публікації у зарубіжних наукових іноземних виданнях, які проіндексовані у НМБД Scopus:

5. Galinska T., **Azizova A.**, Ovsii D., Ovsii O. and Striuk R. (2026) Calculation of bending strength of RC beams reinforced with added longitudinal reinforcement under loading conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. **3251** 012048 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3251/1/012048>

(Особистий внесок: запропоновано методичні основи розрахунку міцності на згин і проектування підсилення збірних залізобетонних балок шляхом нарощування перерізу в розтягнутій зоні за допомогою додаткових арматурних стержнів, які локально з'єднуються зварними переривистими швами з існуючими поздовжніми арматурними стержнями при дії експлуатаційного навантаження)

6. Azizov, T., **Azizova, A.**, Al Ghadban, S. (2018): Construction and calculation of reinforced concrete overlap with a high spatial work effect. *Int. J. Eng. Technol.* **7**(3.2), 567. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14591>

(Особистий внесок: наведено методику визначення зусилля між полицею та ребрами балки збірного монолітного залізобетонного перекриття під час її згину, яка базується на теорії складних стрижнів. Запропонований в статті методичний підхід був використаний в дисертаційній роботі при розробці методики визначення зусилля зсуву, яке виникає вздовж площини стикування додаткового залізобетонного шару набетонування з верхньою площиною залізобетонної балкового конструктивного елементу перекриття залежно від випадку напружено-деформованого стану в його розрахунковому комбінованому перерізі при згині)

7. Kochkarev, D., Azizov, T., **Azizova, A.**, Galinska, T. (2021): Designing of standard cross sections of composite bending reinforced concrete elements by the method of design resistance of reinforced concrete. In: Blikharsky, Z. (ed.) *Proceedings of EcoComfort 2020*, pp. 202–211. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_25

(Особистий внесок: запропоновано метод розрахунку комбінованих згинальних елементів на основі методу розрахункових опорів залізобетону, який був використаний при розробці методики розрахунку та проектування стандартних поперечних комбінованих перерізів згинальних залізобетонних елементів, які утворюються при їх підсиленні)

8. Rizak, V., Kochkarev, D., **Azizova, A.**, Galinska, T. (2023). Approximation Models of the Method of Design Resistance of Reinforced Concrete for Bending Elements with Double and Multirow Reinforcement. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*,

vol 299, pp. 285-292. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_23

(Особистий внесок: запропоновано апроксимаційні поліноміальні та лінійні моделі методу розрахункового опору залізобетону для розрахунку нормальних перерізів залізобетонних згинальних елементів з подвійним та багаторядним армуванням, які розроблені на основі методу розрахункового опору залізобетону, котрий базується на прийнятті гіпотези Бернуллі та використанні екстремального критерію для визначення несучої здатності на основі нелінійної деформаційної моделі розрахунку та діаграм деформації бетону. Запропоновані апроксимаційні формули дозволили значно спростити розрахунок несучої здатності та площі робочої арматури нормальних комбінованих перерізів залізобетонних згинальних елементів з подвійним та багаторядним армуванням, які утворюються при їх підсиленні)

9. Kochkarev, D., Kosior-Kazberuk, M., **Azizova, A.**, Pavlikov, A., Galinska, T. (2023): Calculation of overreinforced concrete bending elements based on modern models for deformation of materials. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds.) *Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 299, pp. 335–345. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_27

(Особистий внесок: викладені моделі і методи розрахунку: нелінійна модель деформації з екстремальним критерієм; нелінійна модель деформації з постійними граничними значеннями деформацій стиснутого бетону; метод розрахункового опору залізобетону; інженерні методи на основі спрощених діаграм деформації, які були використані при розробці методики розрахунку та проектування стандартних поперечних композитних перерізів згинальних залізобетонних елементів, які утворюються при їх підсиленні)

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на конференціях:

10. **Азізова, А.Г.**, Овсій, Д.М. (2024, 14-23 травня). Підсилення залізобетонних балок шляхом нарощування перерізу розтягнутої зони. *Зб. матеріалів 76-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів університету*. Том 1. Полтава: НУПП, 194-195.

11. Азізова А.Г. (2024, 06 листопада). Застосування екологічного бетону і розчину при ремонті і підсиленні бетонних і залізобетонних конструкцій шляхом нарощування перерізу. *Зб. тез міжн. наук.-практ. конф. студ., асп. та молодих вчених: Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики*. Полтава: НУПП, 287-289.

12. **Азізова, А.Г.**, Овсій, Д.М., Овсій, О.М. (2024, 20-22 листопада). Аналіз факторів впливу на напружено-деформований стан залізобетонний балок, які підсилені шляхом нарощування поздовжньої арматури. *Зб. тез доповідей 10-ї*

міжн. наук.-техн. конф.: Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті. Харків: УкрДУЗТ, 138-140. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/28247>

13. Азізова, А.Г., Овсій, О.М., Овсій, Д.М. Удосконалення методики проектування залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу одночасно в стиснутій та розтягнутій зонах. *Новітні тенденції розвитку міського будівництва та господарства: тези доповідей V-ї Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції* (23-25 квітня 2025 року, м. Рівне). Том 2. Рівне: НУВГП, 2025. – С. 49-50.

14. Азізова, А.Г., Овсій, Д.М. (2025) Міцність на згин залізобетонних балок монолітного перекриття, які підсилені шляхом нарощування перерізу одночасно в стиснутій та розтягнутій зонах додатковими залізобетонним шаром та армуванням. *Зб. матеріалів 77-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів університету* (16-22 травня 2025 року, м. Полтава). Том 1. Полтава: НУПП, 2025. – С. 137-139.

15. Азізова, А.Г. (2025) Ремонт і підсилення бетонних і залізобетонних конструкцій за допомогою екологічного бетону і розчину. *Матеріали IV-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»)* (13-14 травня 2025 року, м. Київ). Київ: КНУБА, 2025, 10-11.

16. Азізова, А.Г., Стрюк Р.І., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. Підсилення збірних залізобетонних круглопорожнистих плит перекриття при переобладнанні підвальних приміщень існуючих цивільних будівель в приміщення подвійного призначення. *Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції: робоча програма та тези доповідей V-ї Міжнародної наук.-практ. конф.* (14-16 травня 2025 року, м. Київ). Київ: КНУБА, 2025.- С.128-129.

17. Азізова, А.Г., Стрюк Р.І., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. Розрахунок конструктивних компонентів при підсиленні залізобетонних балкових елементів одночасно в стиснутій і розтягнутій зонах перерізу. *Актуальні проблеми інженерної механіки: тези доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф.* (21-23 травня 2025 року, м. Одеса)./ за заг. ред. М. Г. Сур'янінова. - Одеса: ОДАБА, 2025.- С.19-23.

18. Река, А.В., Азізова, А.Г., Овсій, Д.М., Овсій, О.М. Підвищення міцності на згин металевих балок під навантаженням шляхом їх підсилення додатковими сталевими елементами чи арматурними стержнями. *Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні будівельні конструкції з металу та деревени"* (12-14 червня 2025 року, м. Одеса).

19. Азізова А.Г. Класифікація варіантів підсилення балкових і плитних залізобетонних прогонних конструктивних елементів будівель шляхом нарощування їх перерізів. *Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики // Збірник тез за матеріалами II Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, 07 листопада 2025 року. – Полтава:

НУПП імені Юрія Кондратюка, 2025. – С. 200-202.

20. **Азізова А.Г.** Семко О.В. (2025) Вплив конструктивних факторів на міцність при згині і зрізі залізобетонних прогонних елементів, посилених додатковим шаром із фібробетону (UHPFRC): огляд публікацій/ *Академічна й університетська наука: результати та перспективи* : зб. наук. пр. XVIII Міжнар. наук.-практ. конф., 09–12 грудня 2025 р. – Полтава: Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2025.– С. 218–221. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/21012>

21. Стрюк Р.І., **Азізова А.Г.**, Овсій Д.М., Гасенко А.В. Конструктивні рішення будівель і споруд швидкого зведення із збірно-монолітного залізобетону для об'єктів критичної інфраструктури із захисними властивостями укриття II-го типу. *Тези доповідей VI-ї Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції “Новітні тенденції розвитку міського будівництва та господарства”* (22-24 квітня 2026 року, м. Рівне), у 2-х томах. Том 1. Секція 1. Реконструкція об'єктів будівництва. [Електронне видання]. - Рівне: НУВГП, 2026. – С. 72-73.

22. Стрюк, Р.І., **Азізова, А.Г.**, Овсій, Д.М. (2026) Визначення зусилля зсуву між бетонними компонентами у двошарових залізобетонних елементах залежно від випадку граничного напружено-деформованого стану в їх розрахунковому перерізі при згині. *Зб. матеріалів 78-ї наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів університету* (15-22 травня 2026 року, м. Полтава). Том 2. Полтава: НУПП, 2026. – С. 166-169.

ДОДАТОК А.2 Відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи

Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

- 76-й, 77-й та 78-й наукових конференціях професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів національного університету “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” (м. Полтава, НУПП імені Юрія Кондратюка, 14-23 травня 2024 року, 16-22 травня 2025 року та 15-22 травня 2026 року);
- Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики” (м. Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 06 листопада 2024 року);
- 10-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті” (м. Харків: УкрДУЗТ, 20-22 листопада 2024 року);
- V-й і VI-й Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференціях “Новітні тенденції розвитку міського будівництва та господарства” (м. Рівне, НУВГП, відповідно 23-25 квітня 2025 року та 22-24 квітня 2026 року);
- IV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Green Construction» («Зелене будівництво») (м. Київ, КНУБА, 13-14 травня 2025 року);

- V-й Міжнародній науково-практичній конференції “Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції” (м. Київ, КНУБА, 14-16 травня 2025 року);
- XI-й Міжнародній науково.-технічній конференції “Актуальні проблеми інженерної механіки” (м. Одеса, ОДАБА, 21-23 травня 2025 року);
- Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні будівельні конструкції з металу та деревени» (м. Одеса, ОДАБА, 12-14 червня 2025 року);
- II Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (м. Полтава, НУПП імені Юрія Кондратюка, 07 листопада 2025 року);
- XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (м. Полтава, НУПП, 09 – 12 грудня 2025 року).

ДОДАТОК Б
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД, ТЕРИТОРІЙ
УКРАЇНИ



**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ”
(ДП НДІБК)**



вул. Преображенська, 5/2, м. Київ-37, 03037;
тел. (044) 249-38-00, (050) 415-36-22
e-mail: ndibk@ndibk.gov.ua; www.ndibk.com; код ЄДРПОУ 02495431

18.06.2026 № 11-973 На № _____ від _____

Затверджую:
Заступник директора інституту,
Голова ТК 303
Ю.С. Слюсаренко
«16» червня 2026 р

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» АЗІЗОВОЇ Анни Геннадіївни, пошукувача Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» за темою «Міцність на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсиленні шляхом нарощування перерізу», будуть використані при підготовці нової редакції національного стандарту України ДСТУ Б В.2.6-156:2010 «Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування» в частині розрахунку за несучою здатністю підсилених залізобетонних елементів будівель і споруд.

Зав. відділом надійності
конструкцій будівель і споруд ДП «НДІБК»,
доктор техн. наук, проф.

Андрій. Бамбура

Зав. відділення геотехніки і
будівництва в складних інженерно-
геологічних
умовах, канд. техн. наук, с.н.с

Володимир ТИТАРЕНКО



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

просп. Віталія Грицаєнка, 24, м. Полтава, 36011,
тел./факс (0532) 56 98 94, (0532) 60 87 30 (приймальня), web: www.nupp.edu.ua,
e-mail: rector@nupp.edu.ua, kanc@nupp.edu.ua,
Код ЄДРПОУ 02071100

_____ 20 _____ № _____ На № _____ від _____ 20 _____

**Довідка про впровадження результатів дисертації на здобуття
наукового ступеня доктора філософії на тему «Міцність на згин
залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсиленні
шляхом нарощування перерізу» за спеціальністю 192 – Будівництво
та цивільна інженерія (19 – «Архітектура і будівництво»)
Азізової Анни Геннадіївни**

Основні результати дисертаційної роботи аспірантки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Азізової Анни Геннадіївни «Міцність на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсиленні шляхом нарощування перерізу» впроваджено при розробці держбюджетних науко-дослідницьких тем: «Енергоефективні конструктивні рішення елементів будівель», (державний реєстраційний номер 0121U109497, термін виконання у 2021-2022 рр., керівник – д.т.н., професор Семко О.В.) та «Ресурсоощадні технології прискореного відновлення пошкоджених будівель із влаштуванням захисних споруд цивільного захисту», (шифр наукової роботи №109/25; державний реєстраційний номер: 0125U000895, термін виконання 2025-2026 рр., керівник – д.т.н., професор Гасенко А.В.).

Зокрема використано наступні основні результати дисертаційної роботи:

- методика розрахунку міцності на згин і конструювання залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізів одночасно в стисненій і розтягувальній їх зонах;
- методика визначення зусилля зсуву, яке виникає вздовж площини стикування додаткового залізобетонного шару набетонування з верхньою площиною залізобетонної балкового конструктивного елементу перекриття залежно від випадку напружено-деформованого стану в його розрахунковому комбінованому перерізі при згині;

- методика розрахунку та проектування стандартних поперечних перерізів композитних згинальних залізобетонних елементів методом розрахункового опору залізобетону, які утворюються при їх підсиленні;
- методика розрахунку міцності на згин і конструювання залізобетонних балкових елементів, які підсилені шляхом нарощування площі поздовжнього армування в розтягувальній зоні їх перерізу.

Проректор з наукової роботи,
докт. техн. наук, професор



Завідувач кафедри будівництва та
цивільної інженерії, керівник
держбюджетної дослідницької
роботи, докт. техн. наук, професор

Професор кафедри автомобільних
доріг, геодезії та землеустрою,
керівник держбюджетної
дослідницької роботи,
докт. техн. наук, доцент

Олена СТЕПОВА

Олександр СЕМКО

Антон ГАСЕНКО



ТОВ «НТП «АЛЬМАГРУП»
ЄДРПОУ 41479493 IBAN 653052990000026002041201171
в АТ КБ «ПРИВАТБАНК», МФО 305299
вул. Монастирська, 5а, офіс 4-ий поверх, Полтава
Email: management@almagroup.com.ua

№030726/1

м. Полтава
03 липня 2026 р.

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
**«Міцність на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів,
які підсилені шляхом нарощування перерізу»**
на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія
Азізової Анни Геннадіївни

Цим підтверджується, що основні результати дисертаційної роботи аспірантки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Азізової А.Г. «Міцність на згин залізобетонних балкових конструктивних елементів, які підсилені шляхом нарощування перерізу» використано у 2025 – 2026 рр. нашою організацією при розробленні робочих проєктів відновлення пошкоджених споруд фізичного захисту автотрансформаторів на об'єктах НЕК «УКРЕНЕРГО» після їх обстрілів БПЛА внаслідок військових дій. Крім того результати також використано при відновленні і підсиленні залізобетонних конструкцій норійної вежі, яка була пошкоджена внаслідок військових дій.

Зокрема, при використанні результатів досліджень її дисертаційної роботи було обґрунтовано параметри армування залізобетонних балочних конструкцій. Таким чином, достовірність експериментальних й аналітичних досліджень здобувачки підтверджено в реальних умовах будівництва. Станом на сьогодні всі споруди збудовані та успішно виконують свою функцію.

Директор
ТОВ «НТП «АЛЬМАГРУП»



Олександр ПЕТРЕНКО

Технічний керівник з науково-
технічного розвитку, к.т.н., доцент

Максим ХАРЧЕНКО