

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РИБАК РОМАН ТАРАСОВИЧ

УДК 624.012.3/.4

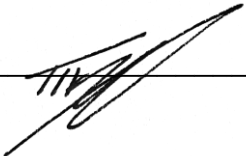
ДИСЕРТАЦІЯ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ТРУБ ПРИ ДІЇ ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ І ВПЛИВІВ

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

 Р. Т. Рибак

Науковий керівник

Парнета Богдан Зіновійович,
кандидат технічних наук, доцент

АНОТАЦІЯ

Рибак Р. Т. Напружено-деформований стан підсиленних залізобетонних труб при дії змінних навантажень і впливів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертація присвячена дослідженню напружено-деформованого стану підсиленних залізобетонних труб та вдосконаленню методів їх підсилення.

У першому розділі **«Стан та аналіз основних методів відновлення несучої здатності водопропускних залізобетонних труб»** проведено комплексний аналіз технічного стану водопропускних залізобетонних труб на автомобільних і залізничних дорогах України та систематизовано основні чинники, що зумовлюють їх пошкодження. Встановлено, що близько 27 % водопропускних труб мають недопустимі дефекти. Наведено огляд існуючих методів оцінювання технічного стану труб і класифікацію ступенів їх експлуатаційної придатності. Розглянуто сучасні інженерно-конструктивні методи підсилення та відновлення залізобетонних труб, з акцентом на їх перевагах і недоліках, що дозволило виявити перспективні напрями для удосконалення технологій. За результатами аналізу сформульовано наукову гіпотезу, мету та завдання дослідження, що орієнтовані на підвищення несучої здатності та довговічності конструкцій шляхом оптимізації існуючих і впровадження нових методів підсилення.

У другому розділі **«Розвиток і розробка методів підвищення несучої здатності пошкоджених залізобетонних труб»** викладено технічне обґрунтування та вдосконалення конструктивних рішень для підсилення залізобетонних труб із метою підвищення їхньої несучої здатності та довговічності. Запропоновано вдосконалення методу гільзування шляхом додавання просторового арматурного каркасу, що забезпечує рівномірний розподіл навантажень і зменшення локальних деформацій. Розроблено технологію ін'єктування для відновлення дефектних труб без зменшення їхньої пропускної здатності. Детально описано послідовність виконання підсилення

за кожною із технологій. Обґрунтовано вибір геометричних параметрів труб і матеріалів для подальших досліджень, а також розглянуто захищені патентами інноваційні рішення, що мають перспективу впровадження в практику ремонту водопропускних труб на автомобільних і залізничних шляхах.

У третьому розділі **«Теоретичне дослідження напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб»** проведено теоретичне оцінювання напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб із використанням методу скінченних елементів і удосконаленої математичної моделі. Проведене числове моделювання дозволило встановити закономірності розподілу деформацій і напружень для труб без підсилення, підсилених методом гільзування та гільзуванням з арматурним каркасом. Побудована модель дозволяє враховувати вплив як статичних навантажень, так і температурного впливу середовища, що забезпечує комплексну оцінку роботи труб у реальних експлуатаційних умовах. Визначено значення деформацій та напружень, виявлено зони концентрації напружень на межах конструкційних матеріалів. Отримані результати підтверджують ефективність застосування вдосконалених методів підсилення й можуть бути використані для подальшої оптимізації конструктивних рішень та вибору ремонтних матеріалів.

У четвертому розділі **«Експериментальна верифікація напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб»** розглянуто експериментальні дослідження, проведені для оцінювання ефективності методів підсилення залізобетонних труб. Описано проведення випробувань на зразках труб, підсилених різними методами, такими як гільзування, гільзування з додаванням арматурного каркасу та ін'єктування епоксидною сумішшю. Розділ включає детальний опис методики проведення досліджень, вибору зразків і використовуваних технічних засобів та методів вимірювань. За результатами експериментів оцінено напружено-деформований стан труб за умов різних типів навантажень і підсилення. Встановлено, що найбільші напруження виникають у вертикальному напрямку труби. Повне руйнування залізобетонних труб підсилених методом гільзування проходить при деформаціях на 12 % вищих, за деформації при яких руйнується залізобетонна труба без підсилення, а для залізобетонних труб підсилених методом гільзування із

використанням арматурного каркасу величина деформацій складає 44 % та 6 % — для ін'єкційного методу. Метод гільзування дозволяє збільшити несучу здатність залізобетонних труб на 28 %, гільзування з додаванням арматурного каркасу — на 39 %, а ін'єктування — на 34 %. Максимальна різниця деформацій порівняно з даними експериментальних випробувань не перевищує 10 %, що свідчить про високу точність та надійність пропонованих методів для підсилення несучої здатності залізобетонних труб.

На основі отриманих даних проведено порівняльний аналіз ефективності запропонованих методів підсилення, що дозволяє зробити висновки щодо доцільності застосування кожного з методів у різних умовах експлуатації.

Аналіз економічної ефективності показав, що підсилення залізобетонних труб є економічно доцільною альтернативою повній заміні конструкцій. Метод ін'єктування є найбільш вигідним економічним варіантом та дозволяє зменшити витрати на 35 % у порівнянні з заміною труби. Вартість гільзування без армування є на 22 % нижчою, а гільзування з армуванням — на 21 % нижчою від вартості заміни труби.

У розділі визначено найбільш ефективні технології підсилення труб, а також розглянуто питання економічної доцільності впровадження кожного з методів. Проведено порівняльний аналіз витрат на підсилення та заміну труб, що дозволяє зробити висновки щодо того, які методи є найбільш вигідними за умов обмежених фінансових ресурсів. Висвітлені економічні переваги відновлення труб, зокрема, з точки зору зниження витрат на їх заміну.

Ключові слова: арматурний каркас, водопропускна труба, довговічність, залізобетон, гільзування, метод скінченних елементів, міцність, надійність, напружено-деформований стан, підсилення, пошкодження, ремонт, скінченно-елементна модель, теоретичні та експериментальні дослідження, температурні впливи.

ABSTRACT

Rybak R. T. Stress-Strain State of Strengthened Reinforced Concrete Pipes Under Variable Loads and Impacts. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 192 Construction and Civil Engineering. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation is dedicated to the investigation of the stress-strain state of strengthened reinforced concrete pipes and the enhancement of strengthening methods.

The first chapter, "**Condition and Analysis of Major Methods for Restoring the Load-Bearing Capacity of Reinforced Concrete Culvert Pipes**" presents a comprehensive analysis of the technical condition of reinforced concrete culvert pipes on automobile roads and railways in Ukraine and systematizes the main factors causing their damage. It was established that approximately 27 % of culvert pipes have unacceptable defects. The chapter provides an overview of existing methods for assessing the technical condition of pipes and a classification of serviceability levels. Modern engineering and structural methods for strengthening and restoring reinforced concrete pipes are considered, with an emphasis on their advantages and disadvantages, which made it possible to identify promising directions for technological improvement. Based on the analysis, a scientific hypothesis, research objectives, and tasks were formulated, aimed at increasing the load-bearing capacity and durability of the structures through the optimization of existing and the implementation of new strengthening methods.

The second chapter, "**Development and Improvement of Methods for Enhancing the Load-Bearing Capacity of Damaged Reinforced Concrete Pipes**" presents the technical justification and improvement of structural solutions for the strengthening of reinforced concrete pipes to increase their bearing capacity and service life. An improved sleeving method is proposed, involving the addition of a spatial reinforcement cage, which ensures a uniform load distribution and reduces local deformations. A grouting technology is developed for restoring defective pipes without reducing their hydraulic capacity. The sequence of strengthening works for each method is described in detail. The selection of geometric parameters and materials for further research is substantiated, and patented

innovative solutions with practical implementation potential in culvert pipe repair on roads and railways are reviewed.

The third chapter, "**Theoretical Study of the Stress-Strain State of Strengthened Reinforced Concrete Pipes**" presents a theoretical evaluation of the stress-strain state of strengthened reinforced concrete pipes using the finite element method and an advanced mathematical model. Numerical modeling revealed patterns in the distribution of stresses and strains for unstrengthened pipes and pipes strengthened by sleeving and sleeving with reinforcement cages. The developed model accounts for both static loads and environmental temperature effects, enabling a comprehensive evaluation of the pipes under real operating conditions. The values of stresses and strains were determined, and zones of stress concentration at the interfaces of construction materials were identified. The obtained results confirm the efficiency of the improved strengthening methods and can be used for further optimization of structural solutions and the selection of repair materials.

The fourth chapter, "**Experimental Verification of the Stress-Strain State of Strengthened Reinforced Concrete Pipes**" presents experimental research conducted to evaluate the effectiveness of various strengthening methods. Tests were performed on pipe samples strengthened by sleeving, sleeving with reinforcement, and injection with an epoxy mixture. The chapter includes a detailed description of the experimental methodology, sample selection, technical equipment, and measurement methods. Based on the experiments, the stress-strain state of pipes under different types of loads and strengthening was evaluated. It was found that the highest stresses occur in the vertical direction of the pipe. Complete failure of reinforced concrete pipes strengthened by sleeving occurred at strains 12 % higher than those at failure of unstrengthened pipes. For pipes strengthened by sleeving with reinforcement, the strain increase reached 44 %, and for the injection method – 6 %. The sleeving method increased the load-bearing capacity by 28 %, sleeving with reinforcement – by 39 %, and injection – by 34 %. The maximum deviation between theoretical and experimental results did not exceed 10 %, indicating high accuracy and reliability of the proposed strengthening methods.

Based on the results, a comparative analysis of the effectiveness of the proposed strengthening methods was conducted, allowing conclusions regarding the applicability of each method under various operational conditions.

An economic efficiency analysis demonstrated that strengthening reinforced concrete pipes is a cost-effective alternative to complete replacement. The injection method proved to be the most economically advantageous, reducing costs by 35 % compared to pipe replacement. Sleeving without reinforcement reduced costs by 22 %, and sleeving with reinforcement – by 21 %.

The chapter identifies the most effective strengthening technologies and addresses the economic feasibility of each method's implementation. A comparative analysis of the costs of strengthening versus replacement was conducted, allowing for conclusions on the most cost-effective methods under conditions of limited financial resources. The economic benefits of pipe restoration, particularly in terms of reduced replacement costs, are highlighted.

Keywords: armature cage, culvert pipe, durability, reinforced concrete, sleeving, finite element method, strength, reliability, stress-strain state, strengthening, damage, repair, finite element model, theoretical and experimental research, temperature effects.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. **Rybak R.**, Kovalchuk V., Parneta B., Parneta O., Bal O., Boiarko V. Stress-strain state of reinforced concrete pipes under the influence of climatic temperature changes in the environment // Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture : collection of scientific works. 2022. Iss. 86. P. 54–61. Odesa : OSACEA. DOI: 10.31650/2415-377X-2022-86-54-61 (Рибак Р. Т. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Ковальчук В. В. – робота з даними; Парнета Б. З. – редагування, рецензування; Парнета О. Б. – формулювання висновків; Баль О. М. – методологія; Боярко В. В. – робота з ілюстративними матеріалами).

2. **Rybak R.** Experimental testing methodology of stress-strain state of the reinforced concrete pipe with strengthening // Theory and Building Practice. 2022. Vol. 4, No. 2. P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.02.036>.

Статті у наукових виданнях, що включені до наукометричної бази даних SCOPUS:

3. Kovalchuk V., Onyshchenko A., Fedorenko O., Habrel M., Parneta B., Voznyak O., Markul R., Parneta M., **Rybak R.** A comprehensive procedure for estimating the stressed-strained state of a reinforced concrete bridge under the action of variable environmental temperatures // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 2, No. 7(110). P. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228960> (Ковальчук В. В. – аналіз даних; Онищенко А. М. – рецензування; Федоренко О. В. – формулювання висновків; Габрель М. М. – методологія; Парнета Б. З. – інтерпретація даних; Возняк О. М. – оцінювання публікації на предмет новизни; Маркуль Р. В. – концепція дослідження; Парнета М. Б. – робота з ілюстративними матеріалами; Рибак Р. Т. – огляд та аналіз актуальних досліджень за тематикою публікації).

4. Kovalchuk V., Koval M., Onyshchenko A., Kravets I., Bal O., Markul R., Vikhot S., Petrenko O., **Rybak R.**, Milyanych A. Determining the Strained State of Prefabricated Metal Corrugated Structures of a Tunnel Overpass Exposed to the Dynamic Loading from Railroad Rolling Stock // Eastern-European Journal of Enterprise

Technologies. 2022. Vol. 3, No. 7(117). P. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259439> (Ковальчук В. В. – аналіз даних; Коваль М. П. – рецензування; Онищенко А. М. – формулювання висновків; Кравець І. Б. – методологія визначення деформованого стану; Баль О. М. – інтерпретація даних; Маркуль Р. В. – концепція дослідження; Віхоть С. І. – оцінювання публікації на предмет новизни; Петренко О. В. – редагування; Рибак Р. Т. – огляд та аналіз актуальних досліджень за тематикою публікації, робота з ілюстративними матеріалами).

5. Kovalchuk V., **Rybak R.**, Parneta B., Onyshchenko A., Kvasnytsya R. Determining patterns of the deformed state of the transport concrete pipe reinforced with a metal clamp under the action of static load // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 5, No. 7(119). P. 54–66. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265813> (Ковальчук В. В. – аналіз та інтерпретація даних; Рибак Р. Т. – написання статті, визначення особливостей деформованого стану підсиленої труби; Парнета Б. З. – редагування, рецензування; Онищенко А. М. – формулювання висновків; Квасниця Р. Б. – аналіз попередніх публікацій).

6. Kovalchuk V., **Rybak R.**, Hnativ Y., Tkachenko V., Onyshchenko A., Kravets I., Hermaniuk Y., Babyak M., Hembara N., Velhan I. Assessment of the stressed-strained state of a reinforced transport pipe under the combined effect of ambient temperature and static loads // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 6, No. 7(120). P. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268904> (Ковальчук В. В. – аналіз та інтерпретація даних; Рибак Р. Т. – написання статті, оцінювання напружено-деформованого стану підсиленої труби при сумісній дії температури середовища та статичних навантажень; Гнатів Ю. М. – редагування; Ткаченко В. А. – рецензування; Онищенко А. М. – концепція дослідження; Кравець І. Б. – формулювання висновків; Германюк Ю. М. – робота з ілюстраціями; Баб'як М. О. – огляд та аналіз актуальних досліджень; Гембара Н. О. – методологія; Вельган І. В. – затвердження публікації).

7. **Rybak R.**, Kovalchuk V., Parneta B., Karnakov I. Investigation of Reinforced Concrete Pipe Deformability by Reinforcement Frame Under Static Loads // In: Blikharsky Z., Koszelnik P., Lichołai L., Nazarko P., Katunský D. (eds) Proceedings of

CEE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering. Cham: Springer, 2024. Vol. 438. P. 351–361. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_35 (Рибак Р. Т. – аналіз та інтерпретація даних, оцінювання впливу арматурного каркасу на деформації залізобетонної труби; Ковальчук В. В. – методологія, написання статті; Парнета Б. З. – редагування, рецензування; Карнаков І. А. – формулювання висновків).

8. Kovalchuk V., Parneta B., **Rybak R.** Methodology of Experimental Studies of the Deformed State of a Concrete Pipe Restored Polymer Repair Mix // Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 59. P. 360–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.051> (Ковальчук В. В. – аналіз та інтерпретація даних; Парнета Б. З. – рецензування, редагування та формулювання висновків; Рибак Р. Т. – написання статті, методологія, визначення впливу застосування ін'єкційного методу для відновлення несучої здатності залізобетонної труби на деформативність).

9. Parneta B., Kovalchuk V., **Rybak R.** Methodology for Evaluating the Stress-Strain State of Strengthened Concrete Pipe Using the Finite Element Method with FEMAP with NX Nastran // International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 415–425. DOI: [10.1007/978-3-031-67576-8_37](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_37) (Парнета Б. З. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Ковальчук В. В. – редагування та рецензування статті; Рибак Р. Т. – методологія, побудова скінчено-елементної моделі труби та виконання теоретичних розрахунків).

Патенти:

10. Спосіб підвищення несучої здатності та довговічності дефектних залізобетонних труб / Ковальчук В. В., Парнета Б. З., **Рибак Р. Т.** : пат. 152813 Україна : F16L 9/18, F16L 7/02, F16L 55/18, E01D 22/00, E03F 3/00. № u 2022 03685 ; опубл. 12.04.2023, Бюл. № 15. 5 с.

11. Спосіб підвищення несучої здатності бетонних труб / Ковальчук В. В., Парнета Б. З., **Рибак Р. Т.** : пат. 156692 Україна : F16L 55/18, F16L 9/18, F16L 7/02, E03F 3/00. № u 2024 00673 ; опубл. 23.07.2024, Бюл. № 30. 5 с.

Інші публікації:

12. Онищенко А. М., Ковальчук В. В., Федоренко О. В., Парнета Б. З., **Рибак Р. Т.**, Парнета М. Б. Методика оцінювання теплових потоків, що діють на сталезалізобетонні мости // Промислове будівництво та інженерні споруди. 2021. № 3. С. 37–41. (Онищенко А. М. – аналіз та інтерпретація даних; Ковальчук В. В. – написання статті; Федоренко О. В. – формулювання висновків; Парнета Б. З. – редагування та рецензування статті; Рибак Р. Т. – визначення впливу теплових потоків, що діють на транспортні споруди; Парнета М. Б. – аналіз попередніх публікацій).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. **Рибак Р. Т.** Дослідження термонапруженого стану залізобетонної труби підсиленої металевою гофрованою конструкцією // 78-ма Студентська науково-технічна конференція : зб. тез доп. Вип. за жовтень 2020 р. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. С. 35–37.

14. Парнета М. Б., **Рибак Р. Т.**, Парнета О. Б. Особливості виготовлення бетонів для підвищення медійності будівель та споруд // IX Міжнар. наук.-практ. конф. "EURASIAN SCIENTIFIC DISCUSSIONS", 25–27 верес. 2022 р., Барселона, Іспанія. World of Conferences. Proceedings. Барселона, 2022. С. 84–86.

15. **Rybak R.**, Parneta O. Reasoning of the methodology for evaluating the effectiveness of strengthening reinforced concrete pipes // III International Scientific Conference "Scientific advances and innovative approaches", 23–24 February 2023, Tokyo, Japan. World of Conferences. Tokyo, 2023. P. 83–85.

16. Парнета Б. З., **Рибак Р. Т.** Оцінювання впливу каркасного армування бетонної труби на деформативність при дії статичних навантажень // Концептуальні проблеми розвитку сучасної гуманітарної та прикладної науки : матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. симп., 9 трав. 2024 р., Івано-Франківськ, 2024. С. 160–163.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. СТАН ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ВОДОПРОПУСКНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ	20
1.1. Залізобетонні водопропускні труби: застосування, типи, вимоги норм	20
1.2. Технічний стан, аналіз дефектів та пошкоджень водопропускних труб.....	28
1.3. Аналіз методів оцінювання напружено-деформованого стану труб та залишкового ресурсу за визначальними параметрами технічного стану відповідно до нормативних документів	47
1.4. Огляд і класифікація методів підсилення водопропускних залізобетонних труб та доцільність застосування відомих технологій відновлення.....	63
1.5. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза. Мета і задачі дослідження.	70
Висновки до розділу 1	73
РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК І РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПОШКОДЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ	74
2.1. Аналіз існуючого досвіду і теоретичні дослідження підсилення залізобетонних труб методом гільзування	74
2.2. Конструктивні параметри дослідних зразків труб	74
2.3. Вдосконалення методу гільзування додаванням арматурного каркасу	90
2.4. Використання методу ін'єктування для відновлення труб.....	94
2.5. Інноваційні методи підсилення залізобетонних труб	99
Висновки до розділу 2	101
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ	103
3.1. Загальні положення теоретичного дослідження напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб	103
3.2. Визначення напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб методом скінченних елементів	105
3.2.1. Геометричні параметри та побудова скінчено-елементних моделей.....	105
3.2.2. Оцінювання напружено-деформованого стану залізобетонних труб при дії силових навантажень	108
3.2.3. Оцінювання напружено-деформованого стану залізобетонних труб при дії температурних впливів.....	117

3.3. Одновимірна математична модель оцінювання напружено-деформованого стану.....	121
3.3.1. Геометричні параметри та матеріали тришарової підсиленої труби.....	121
3.3.2. Удосконалена математична модель для оцінювання напружено-деформованого стану підсиленої тришарової труби.....	122
3.3.3. Результати розрахунку напружено-деформованого стану підсиленої труби за математичною моделлю	125
Висновки до розділу 3	128
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОВОГО СТАНУ ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ.....	129
4.1. Загальні положення експериментальних досліджень	129
4.2. Об'єкт та методика досліджень.....	131
4.2.1. Опис зразків для випробувань	131
4.2.2. Розробка методології експериментальних випробувань	131
4.2.3. Опис методу випробувань.....	154
4.3. Результати експериментальних досліджень.....	158
4.3.1. Серія I. Залізобетонна труба без підсилення – еталон	158
4.3.2. Серія II. Залізобетонна труба, підсилена методом гільзування	163
4.3.3. Серія III. Залізобетонна труба, підсилена гільзуванням із додаванням арматурного каркасу	168
4.3.4. Серія IV. Відновлені труби методом ін'єктування епоксидної суміші.....	173
4.4. Аналіз результатів досліджень напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб при дії силових навантажень.....	178
4.5. Техніко-економічна ефективність запропонованих рішень	184
Висновки до розділу 4	187
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	189
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	191
ДОДАТОК А	209
ДОДАТОК Б.....	212
ДОДАТОК В	217

ВСТУП

Інженерні споруди транспорту відіграють важливу роль в економічному та оборонному значенні держави. Однією із умов безпечного пропуску транспортних засобів є належний технічний стан споруд, особливо на автомобільних дорогах та залізничних коліях. Наймасовішими типами інженерних споруд транспорту є бетонні труби. Однак більшість залізобетонних труб експлуатуються тривалий термін в умовах змінного впливу навколишнього середовища та навантажень від транспорту, що спричиняє пошкодження та дефекти цих споруд. Поява у них дефектів та пошкоджень призводить до зниження пропускної та провізної здатностей. У результаті це вимагає проведення ремонтних заходів.

Одним із перспективних методів підсилення пошкоджених залізобетонних труб є гільзування – встановлення нової труби меншого діаметра всередину пошкодженої труби з подальшим заповненням простору між ними ремонтною сумішшю. Такий підхід дозволяє не лише відновити несучу здатність труби, а й покращити її довговічність та стійкість до подальших навантажень. Однак, досягнення оптимальних результатів підсилення вимагає детального дослідження напружено-деформованого стану підсилених труб при дії змінних навантажень.

Актуальність дисертаційного дослідження обумовлена:

- значним поширенням залізобетонних труб у системах водопостачання, водовідведення та інших інженерних мережах, що з часом піддаються руйнівним процесам;
- потребою у відновленні та підсиленні існуючих залізобетонних труб без значних економічних та технічних затрат;
- необхідністю розробки ефективних методів підсилення залізобетонних труб, які дозволяють підвищити їх довговічність та стійкість до змінних навантажень;
- відсутністю достатніх експериментальних даних про напружено-деформований стан підсилених труб при дії змінних навантажень, що ускладнює оптимізацію технологій підсилення;
- зростаючими вимогами до надійності та безпеки інженерних споруд в умовах сучасної урбанізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:

Дослідження здійснене в межах наукового напрямку кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка» – «Технологія будівництва, дослідження прогресивних конструкцій, матеріалів та методів зведення будівель та споруд». Тема дисертації відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики України в галузі управління експлуатаційною надійністю і довговічністю споруд і конструкцій: з Постановою Кабінету Міністрів України від 5 травня 1997 №409 «Про забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж», а також з Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11 червня 2003 №351-р «Про схвалення Концепції державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних Галузях Економіки», відповідає бюджетній програмі «Розвиток мережі та утримання автомобільних доріг загального користування державного значення» (КПКВ 3111020), договір від 23 листопада 2023 р. № 102-23 «Провести дослідження та розробити методичні рекомендації з відновлення водопропускальних труб з металевих гофрованих конструкцій» (номер держреєстрації теми: 0123U104761) 2023–2024 роки.

Мета роботи: розробити методи відновлення та підвищення несучої здатності і довговічності водопропускних залізобетонних труб.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі **науково-технічні завдання:**

1. Провести аналіз інженерно-конструктивних методів підвищення несучої здатності водопропускних труб в експлуатаційних умовах.
2. Розробити ефективні методи і технологію підвищення несучої здатності пошкоджених залізобетонних труб зі зниженими міцнісними характеристиками.
3. Виконати розрахунок напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб методом скінченно-елементного аналізу із врахуванням дії силових навантажень та температурних впливів.
4. Розвинути математичну модель оцінювання напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб при дії температурних впливів та виконати відповідні дослідження.

5. Експериментально дослідити роботу підсиленних різними методами водопропускних залізобетонних труб на стадії експлуатаційних навантажень, а також у граничному стані за міцністю для доведення ефективності розроблених методів.

6. Провести порівняльний аналіз результатів експериментальних випробувань і теоретичних досліджень підсиленних водопропускних залізобетонних труб.

7. Визначити техніко-економічну ефективність підсилення пошкоджених залізобетонних труб пропонованими методами.

Об'єкт дослідження: підсилення залізобетонних водопропускних труб зі зниженими міцнісними характеристиками.

Предмет дослідження: напружено-деформований стан залізобетонних труб при дії силових навантажень і впливів.

Методи дослідження. Дисертаційна робота ґрунтується на сукупності загальнонаукових та спеціальних методів, що спрямовані на дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних труб, а саме:

Аналіз існуючих досліджень (огляд сучасних наукових публікацій, стандартів і рекомендацій з теми експлуатації та підсилення залізобетонних труб; методів оцінювання їх напружено-деформованого стану).

Теоретичне моделювання: розробка математичної моделі для прогнозування напружено-деформованого стану залізобетонних труб під впливом змінних навантажень та впливів; використання чисельних методів для розрахунку напружень і деформацій.

Експериментальні дослідження: проведення натурних випробувань для вимірювання деформацій залізобетонних труб, підсиленних пропонованими методами; оцінювання впливу різних параметрів підсилення на результати напружено-деформованого стану труби.

Матеріалознавчі дослідження: аналіз впливу використаних матеріалів на ефективність підсилення.

Аналіз отриманих у результаті експериментальних випробувань даних, порівняння із теоретичними моделями, оцінювання достовірності результатів та їх впливу на розробку рекомендацій.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вдосконалено методику підсилення пошкоджених залізобетонних труб шляхом оптимального армування, бетонування, та при необхідності, ін'єктування їх внутрішнього простору;
- вперше отримано експериментальні результати зміни напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних труб залежно від методу їх підсилення;
- розвинуто математичну модель оцінювання напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб, що враховує сумісну дію силового навантаження та температурного впливу на конструкцію;
- вперше застосовано метод скінченних елементів для визначення несучої здатності та деформативності залізобетонних труб підсилених методом гільзування із використанням арматурного каркасу.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримано Висновки Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) про видачу патенту на корисну модель №152813 «Спосіб підвищення несучої здатності та довговічності дефектних залізобетонних труб», заява № u202203685 від 03.10.2022, опубліковано 12.04.2023; та патенту на корисну модель №156692 «Спосіб підвищення несучої здатності бетонних труб», заява № u202400673 від 09.02.2024, опубліковано 24.07.2024.

Впроваджено результати науково-дослідної роботи під час відновлення залізобетонної водопропускної труби на вул. Драгоманова, 19а у м. Володимирі-Волинському Волинської області, підсилення бетонної водопропускної труби на вул. Стрийській у м. Львові та підсилення бетонного каналізаційного колектора на вул. Бр. Міхновських, 18 у м. Львові від ТзОВ «Фірма ІНТЕРБУД».

Також результати науково-дослідної роботи впроваджено при підсиленні залізобетонної труби методом гільзування при реконструкції автомобільної дороги Н-23 Кропивницький–Кривий Ріг–Запоріжжя на ділянці км 76+100 – км 81+855 та підсиленні залізобетонної труби методом гільзування при капітальному ремонті

автомобільної дороги державного значення М-12 Стрий–Тернопіль–Кропивницький–Знам’янка на ділянці км 707+714 – км 714+545 від ТОВ ВІАКОН УКРАЇНА.

Результати теоретичних досліджень та практичних випробувань, зокрема розроблені методи та рекомендації з підсилення труб використовуються при підготовці студентів в рамках навчальних дисциплін, які викладаються на кафедрі будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка», а саме: в дисципліні «Утримання міської забудови», що викладається для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, вибірковий блок «Міське будівництво та господарство» (розділ «Прокладка підземних інженерних мереж на території мікрорайонів»); в дисципліні «Утримання та використання міської забудови», що викладається для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія освітньо-професійної програми «Міське будівництво та господарство» (розділ «Інженерний благоустрій при реконструкції міста»); в дипломному проєктуванні студентів кафедри будівельного виробництва першого та другого рівнів вищої освіти.

Також результати дослідження впроваджені у навчальному процесі кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)», спеціалізацій 275.02 «Транспортні технології (на залізничному транспорті)» та 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)», які навчаються за освітніми програмами «Транспортні технології (на залізничному транспорті)» та «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» у таких навчальних дисциплінах: «Загальний курс транспорту» – використані матеріали, які містять пропоновані методи підвищення несучої здатності транспортних споруд (Тема 1 – «Проектування поперечного профілю дороги», Тема 2 – «Проектування поздовжнього профілю дороги»); «Транспортні засоби та інфраструктура залізниць» – використані матеріали щодо експлуатації та методів підсилення труб на залізничних шляхах сполучення (Тема 1 – «Загальні відомості про інженерні споруди транспорту. Служба експлуатації мостів та їх моніторинг», Тема 3

– «Конструкції, проектування та будівництво труб. Підпірні стінки та шумозахисні споруди на залізницях»).

Особистий внесок здобувача. Усі результати, отримані в процесі дисертаційного дослідження, отримані здобувачем особисто. Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні літературних джерел, що стосуються технічного стану та методів відновлення несучої здатності водопропускних залізобетонних труб; обґрунтуванні мети та завдань роботи; розробці ефективних методів підвищення несучої здатності водопропускних залізобетонних труб; удосконаленні математичної моделі; проведенні експериментальних випробувань та інтерпретації отриманих результатів; формулюванні основних теоретичних положень та висновків дисертаційної роботи.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи було висвітлено на 78-мій Студентській науково-технічній конференції (Львів, 2020), IX International Scientific and Practical Conference "EURASIAN SCIENTIFIC DISCUSSIONS" (Барселона, 2022), III international scientific conference "Scientific advances and innovative approaches" (Токіо, 2023), VIII Міжнародному науково-практичному симпозіумі (Івано-Франківськ, 2024).

Публікації. Основний зміст та висновки дисертації висвітлено у 16 наукових публікаціях. Серед них: 2 – у фахових виданнях України; 7 – у наукових виданнях, що включені до наукометричної бази даних SCOPUS; 1 – в інших виданнях; 4 – тези доповідей наукових конференцій; 2 – патенти на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (172 найменування) та додатків. Загальний обсяг роботи становить 228 сторінок: з них 178 сторінок основного тексту, 108 рисунків, 20 таблиць, 18 сторінок зі списком використаних джерел та 19 сторінок із 3 додатками.

РОЗДІЛ 1. СТАН ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ВОДОПРОПУСКНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ

1.1. Залізобетонні водопропускні труби: застосування, типи, вимоги норм

Важливим елементом міського господарства є транспортні споруди, що забезпечують ефективне функціонування транспортної системи. Вони включають широкий спектр інженерних об'єктів, призначених для організації безперервного руху транспортних потоків, зменшення заторів, забезпечення безпеки пересування та оптимізації використання транспортних ресурсів [1]. До основних видів транспортних споруд належать мости, тунелі, шляхопроводи, естакади, віадуки, транспортні розв'язки, водопропускні труби та інші об'єкти, що сприяють безперешкодному руху транспорту й пішоходів [2].

Призначення транспортних споруд полягає у покращенні транспортної логістики, підвищенні ефективності перевезень, зменшенні впливу несприятливих природних умов та забезпеченні довговічності шляхів сполучення. Наприклад, мости та віадуки дозволяють долати природні перешкоди, тунелі – проходити через гірські масиви чи під водними перешкодами, а транспортні розв'язки зменшують конфліктність потоків на перехрестях [3].

Історія розвитку транспортних споруд сягає глибокої давнини. Одними з перших прикладів інженерного мистецтва стали кам'яні римські дороги та акведуки, які забезпечували не лише транспортний зв'язок, а й водопостачання. Протягом століть технології розвивалися, що дозволило будувати складніші й міцніші конструкції. У XIX столітті з появою залізниць і розширенням автомобільного транспорту розпочався активний розвиток мостобудування, а в XX столітті — масове застосування залізобетону в будівництві інфраструктурних об'єктів [4].

Серед різновидів транспортних споруд особливу увагу привертають водопропускні труби (рис. 1.1), які є необхідним елементом дорожньої інфраструктури. Їхня ефективна робота безпосередньо впливає на загальний стан дорожнього покриття та гарантує безпечний рух транспортних засобів. Частка

водопропускних споруд із використанням труб займає значний відсоток від загальної кількості транспортних споруд.



Рис. 1.1. Водопропускні залізобетонні труби [5]

Труби є універсальними конструкціями, які широко використовуються у багатьох сферах будівництва, зокрема завдяки високій технологічності, широкому асортименту виробів, наявності розвинених виробничих потужностей і можливості використання місцевих сировинних матеріалів [6, 7]. Їх активно застосовують у промисловому та цивільному будівництві, у транспортній галузі, гідротехнічних спорудах, міських інженерних мережах для відведення води, а також в іригаційних системах, таких як колектори чи регулятори [8]. Водопропускні труби призначені для пропуску поверхневих та ґрунтових вод під автомобільними та залізничними шляхами, запобігаючи розмиву насипів і забезпечуючи стабільність дорожнього полотна.

У посібнику [9] Ольховик О. І. та Білецький А. А. зазначають, що застосування дорожніх водопропускних труб є одним із найбільш ефективних і відносно економічних способів забезпечення пропуску поверхневих вод під дорожнім насипом. Такий підхід дозволяє зменшити витрати на будівництво та експлуатацію транспортної інфраструктури. У статті [10] Мусієнко І. В. констатує, що на автомобільних дорогах, розташованих у районах із різноманітним рельєфом місцевості, кількість встановлених водопропускних труб у середньому становить близько 1,4 труби на 1 км траси, а серед збірних гідротехнічних споруд трубчасті конструкції складають до 60 % від загальної кількості залізобетонних конструкцій.

Сучасні водопропускні труби виготовляються із різних матеріалів, включаючи метал, пластик, бетон та залізобетон, однак саме залізобетонні труби, завдяки своїй міцності, довговічності та стійкості до навантажень, займають провідне місце у будівництві автомобільних і залізничних доріг. Науковці Кірічек Ю. О., Балашова Ю. Б. та Легка Н. В. у роботі [11] зазначають, що на будівництво залізобетонних водопропускних труб використовується приблизно 9–11 % матеріалу від загальних витрат на штучні споруди. Автори зазначають, що основна частина таких труб – це малі водопропускні конструкції, діаметр отворів яких знаходиться в межах 0,5–1,5 м.

Використання залізобетонних водопропускних труб сприяє підвищенню надійності транспортних шляхів, забезпечуючи стійкість дорожніх конструкцій навіть за значних кліматичних та механічних навантажень.

Прості бетонні труби з'явилися ще в Давньому Римі для водопостачання та каналізації. Однак перші залізобетонні водопропускні труби почали використовувати наприкінці XIX – початку XX століття у Європі та США. До цього основними матеріалами для таких споруд були дерево, камінь і метал. Зокрема, в 1896 році були розроблені гофровані металеві труби, які стали популярними завдяки своїй міцності та економічності [12]. Однак, з часом, через корозію металу, їх довговічність стала проблемою. У зв'язку з цим, залізобетонні труби почали застосовуватися як більш стійка альтернатива [13]. Вони мають високу стійкість до корозії та механічних

пошкоджень, що робить їх ідеальними для використання в дорожньому будівництві та інших інфраструктурних проєктах.

Залізобетон винайшов у 1867 році французький садівник Жозеф Моньє, який запатентував бетонні вироби, укріплені металевими стрижнями [15]. Хоменко О. Г. у посібнику [16] зазначає, що це відкриття започаткувало створення перших залізобетонних конструкцій, включно з трубами. У США бетонна труба в цей час була розроблена на основі роботи Марстона, Андерсона, Шліка та ін. [16] на початку XX століття. Розроблені методи наведено в Посібнику з проєктування бетонних труб у 1970 році [17]. Хоча з часом були досягнуті успіхи у проєктуванні труб та застосовано додаткові критерії проєктування, ці методи для бетонних і металевих труб все ще в основному використовуються сьогодні [18].

Розробка та застосування будь-яких видів трубної продукції тісно пов'язані з удосконаленням відповідної нормативної бази. У США основну роль у створенні стандартів для труб відіграють Американська асоціація державних дорожніх службовців (AASHTO) та Американське товариство з випробувань і матеріалів (ASTM) [19]. Стандарти, розроблені AASHTO, відіграли значну роль у розвитку дорожньої галузі. Вони стали основою для регулювання діяльності багатьох державних установ, зокрема Департаментів автомобільних доріг окремих штатів, Федерального управління автомобільних доріг, Федерального управління цивільної авіації, Інженерного корпусу збройних сил США та інших організацій [20].

Нормативні вимоги до проєктування бетонних водопропускних труб для автомобільних доріг визначалися у всіх редакціях рекомендацій Департаменту транспорту та розвитку США (DOTD) у період з 1929 по 1955 рр [20]. Починаючи з 1966 року й до сьогодні, основним стандартом, що регламентує ці вимоги, є ASTM C76 [21], який встановлює критерії щодо мінімальної товщини стінок труб, міцності бетону на стиск та особливостей їхнього армування [20].

Основними нормативними документами в Австралії та Новій Зеландії, які регулюють встановлення водопропускних труб, є AS/NZS 1254 [22], AS/NZS 1260 [23], AS 1273 [24], AS 5100 [25], а також AS/NZS 3500 [26 – 35].

Вибір матеріалів для водопропускної труби здійснюється з урахуванням вимог до конструкції, міцності, гідравлічного розрахунку, а також довговічності, стійкості до корозії та стирання, що необхідні для конкретних експлуатаційних умов [36, 37].

У Німеччині у 1984 році був розроблений та регулярно оновлюється стандарт для проведення статичних розрахунків різних підземних споруд. Використання цього стандарту при підборі та перевірці правильності вибору трубопроводів відповідно до ATV-DVWK-A127 [38] дозволяє врахувати всі підземні навантаження, які впливають на комунікації, установки та агрегати. Крім того, цей стандарт дає змогу здійснити експертизу проєкту та оцінити, наскільки прийняті інженерні рішення відповідають конкретним інженерно-геологічним умовам. Стандарт дає можливість визначити, чи є запропоноване рішення доцільним для конкретної ситуації. У ньому описуються умови експлуатації споруд з різних матеріалів, таких як бетон, метал, склопластик, ПВХ, а також різні термопластичні матеріали.

В Україні принципи та вимоги щодо проєктування та будівництва дорожніх труб і допоміжних водовідвідних споруд регламентуються ДБН В.2.3-14:2006 [39], ДБН В.2.3-4:2015 [40] та ДСТУ Б В.2.5-63:2012 [41]. Обстеження та випробування труб здійснюється відповідно до ДБН В.2.3-6:2009 [42] та ДСТУ Б В.2.5-46:2010 [43]. Стандарти вимагають при розробці проєкту дорожньої труби забезпечення мінімізації можливості її руйнування у результаті людських помилок експлуатаційного огляду та аварій транспорту.

Шадура В. О. та Кравченко Н. В. у посібнику [44] зазначають, що залежно від технологічних параметрів залізобетонні труби поділяються на напірні та безнапірні. Напірні труби використовуються у підземному прокладанні систем водопостачання та каналізації, де рідина транспортується під тиском. Безнапірні труби застосовуються у системах, де рідина рухається без тиску.

Залізобетонні труби мають ряд переваг, таких як стійкість до корозії, механічних пошкоджень, термічних факторів та хімічного середовища. Вони також характеризуються високою міцністю на розтяг та стиск, що забезпечує їх довговічність та надійність в умовах експлуатації.

Згідно ДБН В.2.3-14:2006 [39] проєктний термін служби труб, протягом якого при належному утриманні труби можуть виконувати передбачені проєктом функції без зниження показників безпеки, що встановлені правилами експлуатації, складає 50 років. Однак Андрійчук О. В. у дисертації [45] зазначає, що практика застосування залізобетонних труб у безнапірних трубопроводах свідчить, що їхній реальний термін служби становить 80–100 років. Напірні залізобетонні труби мають тривалість експлуатації 75–80 років, у той час як металеві трубопроводи служать значно менше – їхній термін експлуатації обмежується приблизно 30 роками. Також автор вказує, що в міжнародній практиці найчастіше використовуються труби діаметром від 300 до 3500 мм. Ці труби належать до найбільш поширених залізобетонних виробів, які активно застосовуються для будівництва та модернізації доріг усіх категорій, незалежно від кліматичних умов.

Залежно від форми поперечного перерізу залізобетонні труби поділяються на кілька типів: круглі, прямокутні, овальні, склепінчасті (рис. 1.2). У роботі [10] автор вказує, що здебільшого на автомобільних дорогах експлуатуються круглі труби (рис. 1.2, *а*), які становлять орієнтовно 87 % від загальної кількості. Також автор зазначає, що прямокутні труби складають 9 %, тоді як інші типи займають лише 4%. Така перевага круглих труб пояснюється їх універсальністю, простотою монтажу та ефективністю у використанні для різних гідравлічних умов.

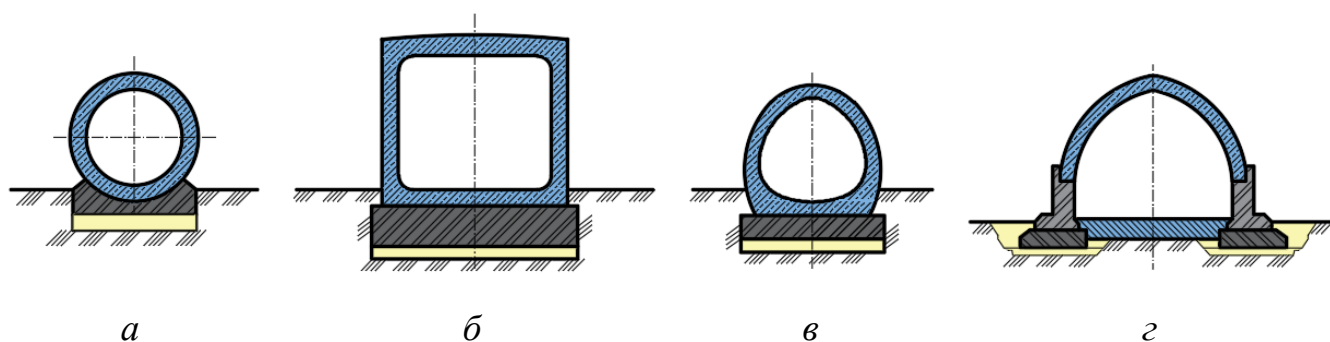


Рис. 1.2. Типи поперечних перерізів залізобетонних труб:

а – круглий; *б* – прямокутний; *в* – овальний; *г* – склепінчастий

Під час прокладання залізобетонні труби можуть монтуватися різними способами залежно від конструктивних особливостей, умов місцевості та технічних вимог [45]. Основними варіантами укладання є:

В траншею – цей метод передбачає розміщення трубопроводу в попередньо підготовленому котловані або траншеї, викопаній у природному ґрунті, що забезпечує стійкість конструкції та захист від механічних навантажень (рис. 1.3, а).

В насип – труби розташовують безпосередньо під товщею насипного матеріалу, що створює додаткове навантаження на конструкцію труби, але водночас забезпечує її стійкість за рахунок ущільненого ґрунтового середовища (рис. 1.3, б).

В проріз – такий метод застосовується у складних інженерно-геологічних умовах, коли труби укладаються у спеціально підготовлені виїмки або заглиблення, наприклад, у скельних породах чи укріплених бетонних конструкціях (рис. 1.3, в).

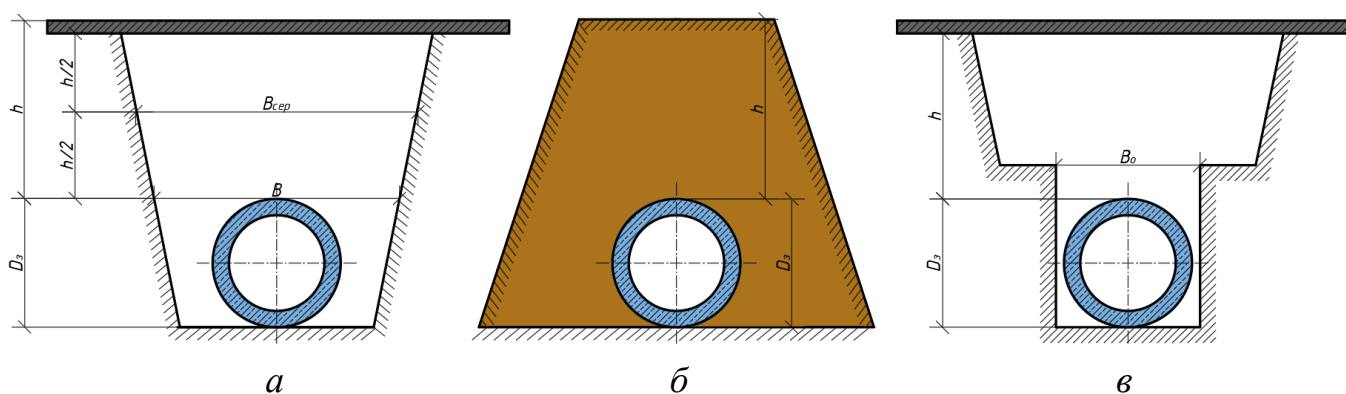


Рис. 1.3. Способи вкладання труб в землю: а – в траншею; б – в насип; в – в проріз

За необхідності можуть застосовуватися спеціально розроблені методи обпирання залізобетонних труб на ґрунтову основу, що забезпечують їхню стабільність, довговічність та рівномірний розподіл навантажень. Залежно від особливостей місцевості, геологічних умов та експлуатаційних вимог, можливе використання таких варіантів основи [45]:

Плоска основа – передбачає встановлення труб безпосередньо на вирівняний та ущільнений ґрунт, що забезпечує рівномірне передавання навантажень і запобігає нерівномірному осіданню (рис. 1.4, а).

Спрофільована основа – полягає у попередньому формуванні в ґрунті спеціального ложа з урахуванням форми труби, що сприяє покращенню контакту між конструкцією та опорною поверхнею, знижуючи ризики деформацій та руйнувань (рис. 1.4, б).

Фундамент – бетонна або залізобетонна основа, що забезпечує максимально надійну опору для труб, особливо у складних гідрогеологічних умовах або при високих навантаженнях на конструкцію (рис. 1.4, в).

Пальова основа – застосовується у випадках, коли природний ґрунт не здатний витримувати навантаження трубопроводу. Для цього використовуються палі, які передають навантаження на глибші, більш стійкі шари ґрунту, підвищуючи надійність конструкції (рис. 1.4, г).

Застосування того чи іншого способу опирання визначається залежно від розрахункових навантажень, типу ґрунту, рівня ґрунтових вод та інших факторів, що можуть впливати на експлуатаційну надійність трубопроводу.

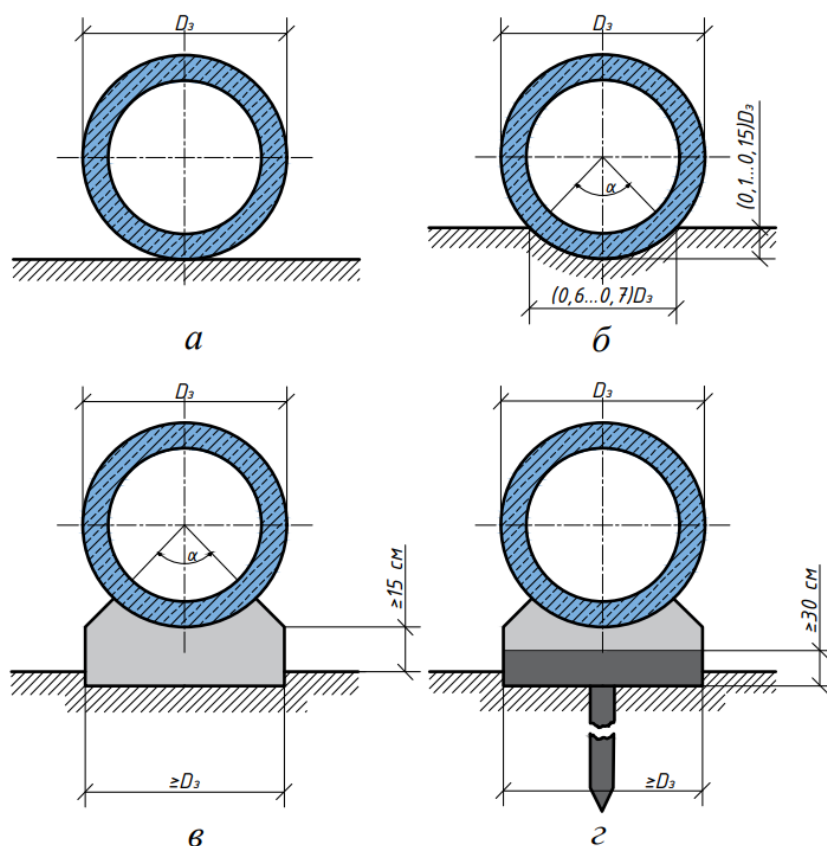


Рис. 1.4. Способи обпирання труб на основу: а – на плоску основу; б – на спрофільовану; в – на фундамент; г – на пальову основу

Дорожні водопропускні труби умовно поділяють на жорсткі та гнучкі, залежно від їхньої поведінки після зведення та в процесі експлуатації. Гнучкі труби характеризуються здатністю змінювати свою форму або деформуватися під впливом навантажень без суттєвих структурних пошкоджень, зберігаючи при цьому свою функціональність. До основних матеріалів, що використовуються для виготовлення таких труб, належать поліетилен, полівінілхлорид, сталь та алюміній. Жорсткі труби, навпаки, відзначаються низькою деформаційною здатністю і практично не змінюють своєї форми під навантаженням. Вони вважаються конструкціями, які не можуть відхилятися від проектного положення більш ніж на 2 % без ризику утворення серйозних пошкоджень, зокрема тріщин, що можуть негативно впливати на їхню міцність і довговічність під час експлуатації [19].

Як гнучкі, так і жорсткі труби потребують якісного засипання ґрунтом, оскільки це забезпечує ефективний розподіл навантаження між трубою та навколишнім середовищем. Однак характер взаємодії труби з ґрунтом суттєво різниться залежно від її типу. У випадку гнучких труб, коли на них діють навантаження від транспортних засобів та власна вага шару засипки, основна частина напружень передається на бічні шари ґрунту, що оточують трубу, завдяки їхній здатності до деформації [46]. Залізобетонні труби відносяться до жорстких, та сприймають навантаження ґрунту завдяки своїй власній міцності, на відміну від пластикових труб, які можуть деформуватися без пошкодження і передавати вертикальне навантаження на навколишній ґрунт, що зумовлює інший підхід до монтажу [36].

1.2. Технічний стан, аналіз дефектів та пошкоджень залізобетонних водопропускних труб

У роботі [47] Лучко Й. Й. та Ковальчук В. В. наголошують, що забезпечення безпечної експлуатації конструкцій будівель і споруд, зокрема бетонних, залізобетонних, сталобетонних, а також прогонових будов мостів і водопропускних труб є одним із ключових завдань сучасної інженерії для підтримки надійної роботи інженерно-технічних секторів економіки індустріальної держави.

У дисертації [48] Давиденко О. О., посиляючись на праці науковців Дехтяра А. С., Лантух-Лященко А. І. та Янчука Л. Л. [49, 50, 51, 52, 53], ДБН [42, 54] та ДСТУ [55], зазначає, що низька довговічність споруд є найбільш тривожною проблемою національної транспортної мережі.

У статті [56] автор зазначає, що протягом останнього часу спостерігається погіршення стану транспортних споруд, зокрема тих, що зведені за типовими проектами. Автор підкреслює, що це пов'язано з впливом зовнішнього середовища, фізичним зносом і старінням матеріалів та конструкцій, а також зі збільшенням осьових навантажень і підвищенням швидкостей руху транспорту.

Ігнорування технічного стану транспортних споруд може спричинити зниження швидкості руху на окремих відрізках дороги або до повної зупинки руху [57], що призведе до збільшення часу перевезення пасажирів і вантажів, особливо у критичних ситуаціях, таких як евакуація населення під час надзвичайних подій, доставка гуманітарної допомоги, транспортування рятувальної техніки або перевезення медичних вантажів для надання екстреної допомоги.

Тютюкін О. Л. та Остапенко І. С. у роботі [58] зазначають, що частина транспортної інфраструктури України зазнала руйнувань внаслідок бойових дій. Автори констатують, що більшість штучних споруд перебуває в експлуатації, знаходячись в незадовільному стані внаслідок фізичного зносу, ненормованих навантажень, пошкоджень внаслідок бойових дій та диверсійної діяльності.

Важливо зазначити, що дефекти інженерних споруд, як і незадовільний стан колії, також стають причиною встановлення попереджень про обмеження швидкості руху поїздів. На момент публікації статті [59] на залізничних сполученнях України діють 102 такі попередження.

Петрович В. В., Скрипник Т. В., Скрипник В. Ю., Чечуга О. С. та Малько М. М. опублікували дані натурних обстежень малих штучних споруд [60]. За результатами обстежень на дорозі Т-08-15 Орхів – Пологи – Кінські Роздори – Андріївка – Нововасилівка – Бердянськ у Запорізькій області авторами зроблено висновок про відсутність періодичного огляду (два рази на рік) та виконання поточного ремонту водопропускних труб, на фоні економічної нестабільності, що негативно впливає на

ефективність ремонтно-відновлювальних робіт. У результаті досліджень встановлено, що стан п'ятої частини труб дороги Т-08-15 не відповідає експлуатаційним вимогам, що пред'являються до малих штучних споруд.

Причиною незадовільного стану водопропускних труб може бути не лише відсутність своєчасних оглядів та ремонтних заходів, а й стихійні лиха, які спостерігаються не лише в Україні, а й за її межами. Так у 2013 році в місті Кенмор, провінція Альберта (Канада), через тривалі інтенсивні опади відбулася масштабна повінь, яка призвела до руйнування майже всіх малих мостів і водопропускних труб у цьому регіоні (рис. 1.5, *а*). Загальні збитки оцінювалися щонайменше у 6 млн канадських доларів. У ході дослідження водопропускних труб було виявлено низку недоліків: помилки при проектуванні, значну корозію конструктивних елементів, а також низьку ефективність гасників енергії. Останнє, зокрема, включало проблеми, пов'язані з гідравлічним стрибком, що стало однією з причин руйнування труб [61].

Дослідник Гаркуша М. В. у роботі [62] зазначає, що руйнування цілісності водопропускної труби може стати причиною як тимчасового, так і тривалого закриття автомобільного руху на відповідній дорозі. Це, у свою чергу, супроводжується значними фінансовими витратами на відновлення або повну заміну пошкодженої труби. Окрім того, повне обвалення водопропускної споруди становить серйозну загрозу для безпеки водіїв. Яскравим прикладом такої катастрофи є подія, що сталася 28 червня 2006 року в штаті Нью-Йорк на автомобільній дорозі I-88 (рис. 1.5, *б*) [63].



а



б

Рис. 1.5. Наслідки повені та обвалу водопропускної труби [62]: *а* – повінь в місті Кенмор, провінція Альберта (Канада); *б* – обвал водопропускної споруди на автомобільній дорозі I-88 в штаті Нью-Йорк (США)

Гармаш А. В. у роботі [64] наголошує, що переважна більшість транспортних споруд, що експлуатуються на залізницях України, є залізобетонними. З практичного досвіду автор зазначає, що підвищення надійності і подовження довговічності споруд можна забезпечити завдяки своєчасно виконаній оцінці технічного стану та проведеним ремонтним заходам. Вартість цих робіт значно нижча від вартості капітального ремонту чи заміни, тому обґрунтоване оцінювання технічного стану та прогнозування поведінки споруди в довгостроковій перспективі упродовж всього життєвого циклу транспортних споруд може гарантувати істотну економію витрат на утримання і експлуатацію.

Онищенко А. М. та Гаркуша М. В. в публікації [65] провели інженерно-геологічне обстеження водопропускної труби на східній околиці м. Хмельницький в межах території автомобільної дороги державного значення М12 Східний під'їзд км 0+000 - км 4+550. Результати огляну свідчать про незадовільний технічний стан споруди: значні тріщини, нерівномірність просідання ланок труби, відривання оголовку та незадовільний стан стиків ланок. Окрім того, Онищенко А. М., Гаркуша М. В. та Клименко М. І. у роботі [19] вказують, що більше 40 % усіх водопропускних труб перебувають у незадовільному або аварійному стані, а на водотоках функціонує значна кількість труб, багато з яких через зношеність, недостатню водопропускну спроможність або інші чинники потребують капітального ремонту, а в окремих випадках – повної заміни.

Основною причиною незадовільного технічного стану штучних споруд є їх значний вік. Згідно даних акціонерного товариства «Укрзалізниця» [59] станом на початок 2019 року, 34,6 % конструкцій на залізничних сполученнях експлуатуються від 50 до 100 років, а 15 % вже перевищили 100-річний термін служби. Конструкції, які повністю вичерпали свій ресурс, потребують заміни, проте реалізувати це складно через обмеженість фінансових ресурсів.

За даними Служби відновлення та розвитку інфраструктури у Тернопільській області [67] усього на державних дорогах Тернопільської області в експлуатації перебувають 1507 водопропускних труб, частину з яких було збудовано більш ніж 60 років тому і відтоді жодного разу не ремонтувалися. Внаслідок десятиліть

експлуатації труби опинилися в аварійному стані, що створює загрозу безпеці руху транспорту.

Згідно з даними [59] на залізничних сполученнях України в експлуатації перебувають близько 7 тис. мостів, 90 шляхопроводів, 251 пішохідний міст та 10940 водопропускних труб. При цьому понад 2,5 тис. споруд, що становить 14,3 % від загальної кількості, мають різного виду дефекти. Серед залізничних мостів несправності виявлені у 1431 споруді, що складає 20,5 %. Близько 259 водопропускних труб є дефектними та потребують негайного капітального ремонту. Дана статистика також висвітлена у роботі [68], де автори наголошують, що в умовах економічного розвитку держави надзвичайно важливо забезпечити безперервність транспортних потоків. Розробка та впровадження новітніх технологій ремонту залізобетонних труб з дефектами стає актуальним і важливим завданням. Досягти цього можливо шляхом застосування сучасних та ефективних технологій відновлення.

Схожу інформацію можна знайти у монографії Пшінька О. М., Краснюка А. В. та Громової О. В. [69], де автори вказують, що на залізницях України налічується близько 20 тис. штучних споруд загальною протяжністю 620,3 км. До них входять 7 824 залізничні мости (зокрема, 34 позакласні, 270 великих, 7 126 середніх і малих, а також 86 тимчасових), 289 пішохідних мостів і 10,9 тис. водопропускних труб. Інфраструктура також включає 44 тунелі загальною розгорнутою довжиною 18 тис. погонних метрів, з яких найбільше знаходиться на Львівській залізниці (30 тунелів), на Донецькій – 4, Придніпровській – 7, Південній – 2, та Південно-Західній – 1 тунель. З усіх тунелів лише 6 є двоколійними. Протяжність земляного полотна залізниць становить 21 947 км, з яких 504 км мають конструктивні дефекти.

Суттєве погіршення технічного стану транспортних споруд, зокрема труб, спостерігається не лише на залізничній мережі, а також і на автодорожній. В Україні, згідно з даними Державної служби автомобільних доріг України (Укравтодор), на автомобільних дорогах в експлуатації 16 082 мости (загальною довжиною 37 1157,0 м.п.) і 12 9053 водопропускні труби. При протяжності мережі доріг загального користування у 169 739 км, на кожний кілометр дороги припадало в

середньому близько 0,8 водопропускної труби. Ковальчук В. В. у роботі [70] вказує, що приблизно 29 % цих труб потребували ремонтних робіт. Підтвердження цієї інформації можна знайти також у роботі Коваля П. М., Баб'яка І. П. та Сітдикової Т. М. [71], де автори констатують, що в експлуатації на автомобільних сполученнях України перебувають 37 425 труб, які є дефектними та потребують проведення ремонтних заходів. Через недостатній обсяг виконання ремонту транспортних споруд упродовж останніх років, частка труб, які перебувають у незадовільному стані та вимагають ремонту, продовжує зростати [70].

На основі проведеного аналізу технічного стану залізобетонних водопропускних труб на залізничних і автомобільних сполученнях України наведено розподіл технічного стану труб в залежності від виду сполучень (рис. 1.6).

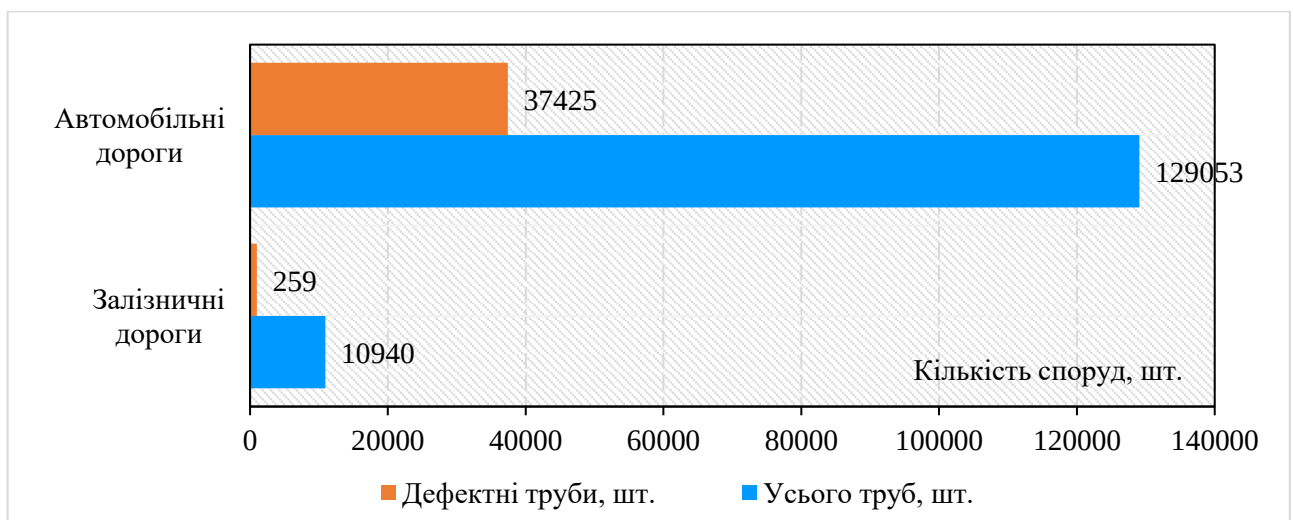


Рис. 1.6. Діаграма розподілу технічного стану труб за видами транспорту

Залізобетонні труби є важливими елементами транспортної інфраструктури, забезпечуючи пропуск води, дренаж та інші функції на автомобільних і залізничних дорогах України. Проте через інтенсивну експлуатацію, вплив кліматичних умов і недостатнє фінансування на утримання, їхній технічний стан поступово погіршується.

Отже, якщо найближчим часом ситуацію з погіршенням технічного стану транспортних споруд не вдасться змінити на краще, то занепад залізничного та автодорожнього господарства буде важко зупинити, а зробити це без достатнього

фінансування доволі складно. Одним із методів продовження їх терміну служби є розробка ефективних технологій ремонту [66].

Застосування економічно вигідних конструкцій та методів їх відновлення сприятиме раціональному використанню капіталовкладень, що дозволить збільшити термін їх експлуатації та зменшити витрати державного бюджету на ремонт і реконструкцію. Розв'язання цього завдання в сфері капітального будівництва споруд тісно пов'язане з оптимальним використанням виділених фінансових ресурсів, що залежить від обґрунтованості рішень, ухвалених на етапах проектування та ремонту транспортних об'єктів [56].

У роботі [68] автори зазначають, що під час будівництва нових магістралей для залізничного та автомобільного транспорту зводиться велика кількість залізобетонних водопропускних труб, які становлять понад 50 % від загальної кількості транспортних споруд. Автори наголошують, що вибір економічно вигідних і раціональних конструкцій та методів ремонту таких труб має вирішальне значення. Це дозволяє не лише оптимізувати капіталовкладення, а й сприяє значному збільшенню терміну експлуатації труб. У свою чергу, продовження терміну служби цих споруд знижує витрати держави на їх ремонт і технічне обслуговування, що позитивно впливає на економіку загалом.

Більшість залізобетонних труб на даний час наближається до межі своєї фізичної або моральної довговічності. Через нераціональне використання та недостатню увагу до технічного обслуговування їхні експлуатаційні характеристики погіршуються, термін служби скорочується, а загальна надійність знижується. Для забезпечення належного технічного стану труб важливо своєчасно здійснювати ремонтні роботи та заходи з їх належної експлуатації.

Для об'єктивного оцінювання технічного стану залізобетонних труб, що перебувають в експлуатації, необхідно мати повну інформацію про дефекти та пошкодження, а також про причини їх виникнення.

Практика експлуатації транспортних споруд показує, що в залізобетонних елементах, особливо тонкостінних, таких як кільця водопропускних труб, з часом з'являються дефекти та пошкодження, які знижують довговічність та несучу

здатність і впливають на безпеку руху по споруді. Від своєчасного усунення цих пошкоджень у початковій стадії їхнього розвитку залежить надійність і безвідмовність роботи споруд. У практиці експлуатації транспортних споруд з цього приводу постійно виникає необхідність розв'язання задач із встановлення режимів подальшої експлуатації транспортних споруд [72, 73, 74].

Коваль П. М., Баб'як І. П. та Сітдикова Т. М. у роботі [71] описують основні пошкодження водопропускних труб, і до числа найбільш розповсюджених пошкоджень та деформацій залізобетонних водопропускних труб відносять: розвиток тріщин кільця, сколювання, вилуговування, розкриття деформаційних швів, просідання та крен ланок та оголовків, порушення гідроізоляції, пошкодження оголовків, розмивання ґрунту в зоні труби. Автори наголошують, що для прийняття раціональних проєктних рішень щодо ремонту труб необхідно врахувати дефекти.

Тріщини розвиваються у різних елементах труби і мають різний характер. Поздовжні тріщини, як правило, виникають у зонах дії максимальних згинальних моментів, якщо розглядати площину поперечного перерізу труби. Крім того, поздовжні тріщини знаходять свій розвиток у ланках під впливом тимчасового навантаження при невеликій товщині засипки над трубою, а також при розвитку нерівномірного осідання фундаменту [71]. Поздовжні тріщини відносять до найбільш небезпечних, що знижують несучу здатність і довговічність елементів труби.

Головними причинами силових пошкоджень водопропускних труб є суттєве збільшення транспортних потоків та застосування сучасної великогабаритної техніки, осьове навантаження якої перевищує проєктні розрахунки [11]. У роботі [75] Чечуга О. С., Каськів В. І. та Петрович В. В. зазначають, що більшість водопропускних труб не відповідає сучасним будівельним стандартам щодо навантаження від транспорту.

У монографії [69] авторами наведено класифікацію основних дефектів елементів бетонних і залізобетонних труб, за їхнім впливом на несучу здатність, довговічність та безпеку руху транспорту, яка наведена в табл. 1.1. Позначення «-» вказує на відсутність впливу дефекту, а «+» свідчить про наявність такого впливу.

Таблиця 1.1.

Перелік дефектів та пошкоджень бетонних і залізобетонних елементів труб [69]

№ п/п	Тип дефекту	Вплив дефекту на:		
		міцність	довговічність	безпека руху
1	2	3	4	5
1	Порушення штукатурки тіла труби і головок	-	+	-
2	Незашпаровані тріщини, які стабілізувалися, відколи, оголення арматури в елементах конструкцій труб	-	+	-
3	Місцеве руйнування лотка труби, наявність зворотних ухилів і застій води	-	+	-
4	Окремі смуги вилуження розчину з тіла труби	+	+	-
5	Зруйнований на довжині 5...10 м лоток труби	+	+	-
6	Відсутність головок, головочних блоків	+	+	+
7	Низькі кордонні камені головок	-	+	+
8	Незашпаровані тріщини в конструкціях труб і головок з можливістю подальшого розвитку	+	+	-
9	Ослаблення кладки з вивалом окремих каменів	+	+	+
10	Незашпаровані шви між кільцями і секціями труби розкриттям 2–5 см без осипання ґрунту	-	+	-
11	Тріщини у тілі труби і головок, які збільшують своє розкриття під навантаженням	+	+	+
12	Вивітрювання цегляної, кам'яної кладки, вивали більше 2 м довжиною і 40 см глибиною	-	+	-
13	Деформації конструкцій труб і головок	+	+	+
14	Деформації і просадки труб, які потребують введення обмеження швидкості поїздів	+	+	+
15	Осипання ґрунту насипу у шви між секціями або кільцями труб під колією	+	+	+

№ п/п	Тип дефекту	Вплив дефекту на:		
		міцність	довговічність	безпека руху
1	2	3	4	5
16	Замулювання русла. Зменшення отвору труби до 20 % наносами, сміттям, наледями без виникнення підпору	-	+	-
17	Розмиви підвідних та відвідних русел за межами мостіння	-	+	-
18	Місцеві деформації мостіння по укосах і руслах без підмиву	-	+	-
19	Пересипане ґрунтом русло нижче труби	-	+	+
20	Розмив русла на вході і виході труби	+	+	+
21	Зменшення отвору труби (від 20 до 50 %) наносами, наледями, сміттям	+	+	+
22	Пересипане ґрунтом русло вище труби	-	+	-
23	Просочування води під мостінням, секціями, кільцями, а також повз труби	-	+	+
24	Збільшення крутизни укосів земляного полотна через недостатню довжину труб, відсутність узбіччя земляного полотна	-	+	-
25	Зменшення отвору труби більше 50 % наносами, наледями, сміттям при небезпеці переливу води через насип або його підмив	+	+	+
26	Підмив фундаментів труб	+	+	+
27	Сповзання укосів насипу біля труби	+	+	+

Причин виникнення дефектів бетонних та залізобетонних труб досить багато, однак основними слід вважати наступні [69]:

- нестійкість бетону та залізобетону до впливу навколишнього середовища, яке з часом стає більш агресивним;
- корозія арматури залізобетонних труб;
- вплив фізичних факторів на конструкцію в цілому або на її складові;

- помилки при проектуванні;
- порушення технології будівництва;
- неякісне поточне утримання при експлуатації труб.

Нестійкість бетону та залізобетону до впливу навколишнього середовища

проявляється у поступовій зміні їхніх властивостей з часом. У залежності від умов експлуатації, фактичний термін служби залізобетонних конструкцій може скорочуватися з 70–80 років до 30–40 років.

Довговічність бетону визначається двома основними параметрами, які можна проконтролювати: карбонізацією та непроникністю. Бліхарський З. Я. у монографії [76] зазначає, що карбонізація передбачає зміну хімічної структури бетону, що з часом спричиняє корозію арматури. Непроникність характеризує здатність бетону протистояти проникненню вологи через конструкцію протягом певного часу. Оскільки структура цементного каменю є пористою, повністю блокувати проникнення вологи неможливо.

Основним фактором, що підвищує міцність бетону, є водоцементне відношення [77]. Оптимальним вважається водоцементне відношення рівне 0,4.

Бетон має лужну природу. Процес карбонізації впливає на його лужність, яка вимірюється за допомогою водневого показника рН. Залежно від значення рН, середовище або матеріали можуть бути кислими ($\text{pH} < 7$), нейтральними ($\text{pH} = 7$) або лужними ($\text{pH} > 7$). Карбонізація та корозія арматури починаються, коли рН досягає значення 9. Лужність бетону є важливим фактором, що захищає арматуру від корозії.

Внаслідок корозії арматура збільшується в об'ємі, що призводить до розриву захисного шару бетону. Відшарування цього шару свідчить про те, що арматура зазнала часткової або повної корозії [78]. Останньою стадією карбонізації є утворення тріщин уздовж арматурних стержнів. Інтенсивність карбонізації залежить від підвищеної температури, високої вологості повітря, наявності агресивних газів, високого водоцементного відношення, надмірної кількості цементу та порушень технології. Кропивницька Т. П., Саницький М. А. та Гев'юк І. М. [79] вказують, що час, необхідний для повної карбонізації, значною мірою залежить від товщини захисного шару, тому в літературі рекомендується збільшити його в 1,5–2,0 рази.

Корозія арматури у залізобетонних конструкціях зазвичай має електрохімічний характер, що виникає під впливом електролітів, таких як вода, кисень та кислоти. При обстеженні залізобетонних труб руйнування бетонного шару та корозію арматури можна виявити вже через 4–5 років після початку експлуатації. Між металами, що знаходяться у контакті в процесі експлуатації, починається електрохімічна взаємодія. У таких конструкціях маловуглецева сталь діє як анод порівняно з низьколегованою. Захисний шар бетону захищає арматуру від корозії, але коли відбувається карбонізація бетону (зниження рН до 9), розпочинається процес корозії [80]. Крім того, Бліхарський З. Я., Хміль Р. Є. та Струк Р. Ф. у роботі [81] зазначають, що на виникнення корозії можуть впливати тріщини в бетоні. Руйнування захисного шару і поява тріщин сприяють проникненню кисню, що активує електрохімічну корозію. Швидкість цього процесу залежить від кількості кисню, що потрапляє в конструкцію, а також від її проникності. Парнета Б. З. в дисертації [82] зазначає, що корозія арматури призводить до зменшення площі її перерізу, що в свою чергу знижує несучу здатність конструкції.

Корозія бетону виникає через хімічну або фізико-хімічну взаємодію матеріалу з агресивними речовинами навколишнього середовища. Під корозією бетону розуміють процес руйнування його структури, надання крихких властивостей під впливом навколишнього середовища. Науковці Клименко Є. В., Пшінько О. М., Краснюк А. В., Пунагін В. В. та Громова О. В. у роботах [83, 84] за механізмом протікання корозійного процесу розрізняють такі основні види корозії: хімічну, фізичну і фізико-хімічну. Зовнішнім проявом корозії бетону є білий наліт на поверхні конструкції в місцях виходу вологи. Цей білий наліт являє собою кристалізовані солі, зокрема осад гідрату оксиду кальцію, який розчиняється у структурі бетону. Втрата вапна через вилуговування зумовлює зменшення міцності бетону до 50 %, що може призвести до руйнування конструкції [85, 86].

Окрім корозії, спричиненої вилуговуванням, в умовах присутності мікроорганізмів може розвиватися біологічна корозія. Грибки, бактерії та водорості проникають у пори бетону, де вони ростуть і накопичують продукти своєї життєдіяльності, які поступово руйнують його структуру [87].

Біологічне пошкодження бетону в основному полягає в порушенні зчеплення його складових частин під впливом кислот мікробного походження (рис. 1.7). Згідно з дослідженням [88] руйнування бетонних конструкцій відбувається через хімічні реакції між цементним каменем і продуктами життєдіяльності мікроорганізмів, зокрема кислот, які сприяють деградації матеріалу.

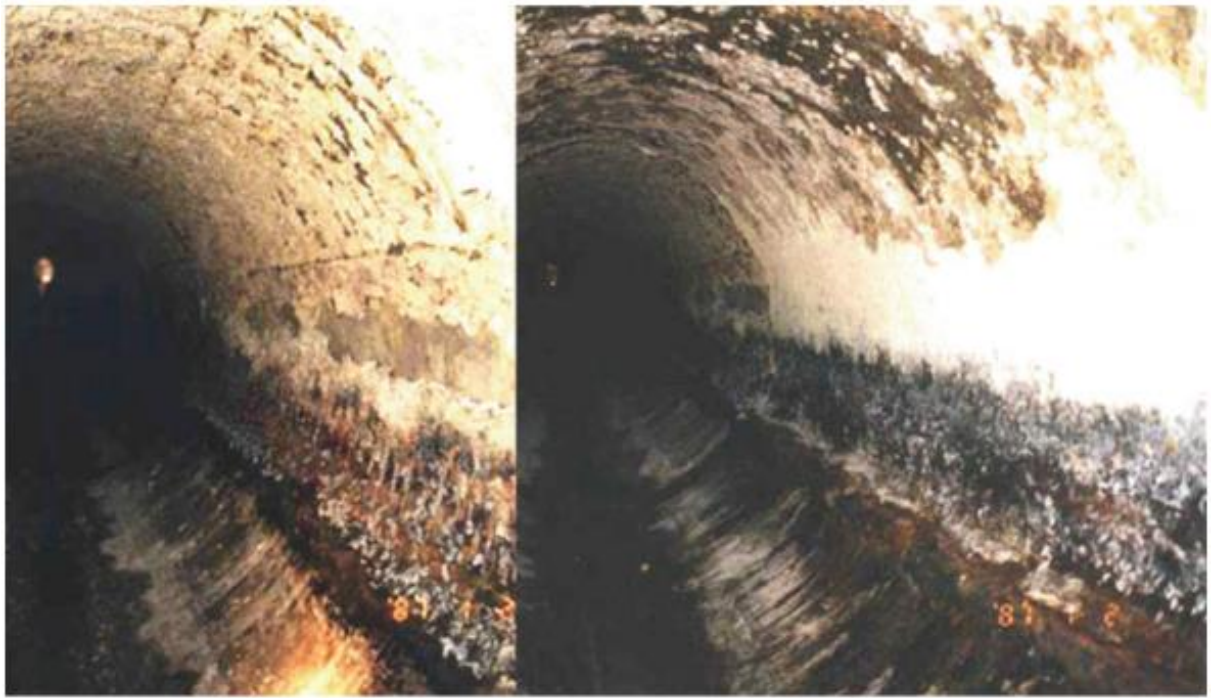


Рис. 1.7. Корозія секцій бетонних труб після 12 років випробування в експериментальній каналізаційній системі Вірджинії в Південній Африці [89, 90]

Пориста структура бетону створює умови для проникнення мікроорганізмів у процеси корозії. Завдяки варіативності розмірів пор, цементний камінь непроникний для часток або мікроорганізмів певних розмірів, що зазвичай менші за середній розмір пор. Коли бетон піддається впливу рідини, він фільтрує воду, затримуючи на своїй поверхні дрібні частки та мікроорганізми, які вступають з ним у взаємодію.

Продукти метаболізму мікроорганізмів, такі як кислоти, сульфіди, аміак та інші сполуки, є агресивними, та викликають руйнування бетонних структур, а також арматури в залізобетонних конструкціях [91]. Ці речовини сприяють хімічним реакціям, що ослаблюють матеріали і знижують їх довговічність.

До *фізичних факторів* можна віднести: механічні навантаження; стирання, що виникає внаслідок постійного впливу води або частинок, які переміщуються в потоці; температурні впливи та агресивні середовища.

Механічні навантаження, що впливають на труби в процесі експлуатації поділяються на:

- статичні навантаження: під впливом довготривалих навантажень труби можуть зазнавати прогинів, появи тріщин, деформацій, або зсувів;
- динамічні навантаження: вплив транспортних засобів, вібрацій, ударів або періодичних імпульсів часто призводить до втомних пошкоджень у матеріалі;
- нерівномірний розподіл навантаження: виникає через неправильну установку труб або осідання ґрунту і може спричинити появу локальних тріщин або навіть обвал конструкції.

Стирання виникає внаслідок постійного руху твердих частинок, таких як пісок та гравій, у воді всередині труб [92]. Унаслідок тривалого впливу значна частина внутрішньої поверхні труби, що знаходиться під водою, може зазнати руйнувань [93]. Швидкість зносу залежить від швидкості течії, а також від розміру й складу частинок піску, гравію та інших включень.

До *температурних впливів* відносять замерзання та розмерзання вологи в порах бетону, внаслідок чого збільшується об'єм приблизно на 9 % [94], що спричиняє утворення мікротріщин. Повторення цього циклу може поступово руйнувати бетон, а розширення та стиснення, які виникають внаслідок постійного чергування нагрівання та охолодження конструкції, спричиняють появу тріщин через температурні напруження [95].

Агресивні середовища можна класифікувати за складом на три типи: тверді (наприклад, пил і ґрунт), рідкі (розчини кислот, лугів, солей, а також продукти нафтопереробки, такі як бензин і масло) та газові (включаючи сірковуглецеві сполуки, вуглекислий газ і сірчистий газ) [96, 97]. Усі ці середовища суттєво впливають на довговічність конструкцій.

Повітряне середовище негативно впливає на конструкції через наявність у атмосфері пилу, газів і хімічних речовин, а також через зміну температури та

радіаційне випромінювання. Особливо це стосується промислових будівель, де навколишнє середовище може бути забруднене агресивними продуктами або відходами [98].

Ґрунтове і водне середовище впливає переважно на опори конструкцій, що перебувають нижче рівня води, та їхні фундаменти. На стан бетону значний вплив мають кислоти, зокрема сірчиста, сірчана та вуглекисла, які вступають у хімічні реакції, що руйнують бетон [99]. У процесі реакції утворюється алебастр з надлишком води, який погано розчиняється та вимивається з бетону [100].

Помилки на етапі проєктування, зазвичай, виникають через недооцінювання або неврахування умов будівництва та експлуатації. До основних помилок, які згодом можуть вплинути на довговічність і несучу здатність, можна виділити такі:

- невідповідність розрахунків навантажень, що може призвести до тріщин або руйнувань конструкцій. Важливо також враховувати зміни навантаження через осідання ґрунту;
- використання матеріалів низької якості або таких, що не відповідають вимогам експлуатації, що може спричинити дефекти, зокрема корозію або хімічні реакції з водою чи ґрунтом;
- неврахування температурних коливань, що можуть викликати розширення або стиснення матеріалу та призвести до тріщин, особливо в умовах великих температурних змін;
- погане проєктування: погане проєктування арматури, її невірний вибір або розташування, що може зменшити здатність труб витримувати навантаження або призвести до корозії арматури;
- ігнорування реальних умов експлуатації, таких як геологічні особливості або рівень ґрунтових вод, що можуть вплинути на стабільність конструкцій;
- заниження товщини захисного шару бетону, що призводить до його руйнування а також сприяє більш інтенсивній корозії арматури;
- неякісне рішення з водовідведення, а саме зменшений діаметр труб.

Дефекти будівництва зазвичай складають близько 70 % від усіх дефектів конструкцій [69]. Вони переважно виникають через відхилення від проєктних рішень,

використання неякісних матеріалів та порушення технологій виготовлення. До основних дефектів на цій стадії належать:

- порушення технологічних норм при виготовленні конструкцій та будівництві в цілому;
- неправильне вирівнювання або похибка в куті установки, що може спричинити нерівномірне навантаження на труби та призвести до виникнення додаткових навантажень через ексцентричні сили;
- недостатнє заглиблення труб в результаті неправильного монтажу або відсутності додаткової стабілізації, що може спричинити деформації або навіть обрушення труб, що особливо критично для труб, які використовуються для водопостачання чи каналізації;
- використання бетону нижчого класу (безпосередньо впливає на довговічність і несучу здатність);
- помилки у визначенні висотних відміток окремих елементів і всієї конструкції, що веде до збільшення постійного навантаження на несучі частини конструкції;
- неякісна гідроізоляція та неправильне виконання герметизації з'єднань, можуть призвести до проникнення води або агресивних речовин, що спричиняють корозію;
- невірне ущільнення або облаштування дренажу, що можуть призвести до потрапляння води або інших рідин в міжтрубний простір, викликаючи корозію або навіть розширення тріщин в трубах;
- використання неякісних матеріалів, або матеріалів, які непридатні для влаштування гідроізоляції елементів труб.

Дефекти, які виникають в процесі експлуатації з'являються, як правило вже у перші роки після введення споруди в експлуатацію, оскільки більшість із них закладена вже на стадії проєктування і, особливо, під час виготовлення і монтажу конструкцій, а також через неякісне утримання труб. Найбільш важливими із них слід вважати:

- механічні пошкодження (для труб великого діаметру), що виникають внаслідок сходження рухомого складу та ударів негабаритними вантажами: відколи, тріщини, руйнування захисного шару, порушення гідроізоляції, пробоїни у стінках труб, розрив стержнів робочої арматури тощо;
- механічні пошкодження, що виникають внаслідок дії криг, корчів та інших предметів під час повені або паводку, підмивання труб;
- пошкодження гідроізоляційного шару, що призводить до проникнення води у конструкцію, спричиняючи вилугування бетону (рис. 1.8, а) та розвиток корозії арматури, які сприяють зниженню міцності бетону і довговічності елементів труб;
- просідання і крен секцій та оголовків труб (рис. 1.8, б) виникають внаслідок недостатньої несучої здатності основи, підмиву труб, збільшення тиску ґрунту та його здирання при експлуатації в суворих кліматичних умовах. Зміщення секцій та оголовків суттєво погіршують працездатність труб, що перебувають в експлуатації, і вимагають проведення відповідних ремонтних робіт для відновлення їх функціонування;
- поздовжні тріщини (рис. 1.8, в), що належать до найбільш небезпечних дефектів, які значно знижують несучу здатність та довговічність елементів труб. У суворих кліматичних умовах експлуатації такі тріщини можуть поширюватися, особливо в зонах крил оголовків;
- поперечні тріщини (рис. 1.8, г), що виникають у ланках та оголовках труб, є результатом впливу значних згинальних моментів у вертикальній площині, спричинених здиранням або нерівномірним осіданням ґрунту під основою труби. Їх наявність суттєво знижує довговічність конструктивних елементів труби;
- відшарування бетону (рис. 1.8, д), яке супроводжується руйнуванням захисного шару та оголенням арматури, найчастіше виникає в основах стінок ланок прямокутного перерізу та оголовках. Такі пошкодження суттєво знижують несучу здатність і довговічність ланок та оголовків, а також часто супроводжуються корозійними процесами в арматурі;

- порушення гідроізоляції, які можна ідентифікувати за зовнішніми проявами, серед яких: поява вологих ділянок або просочування води крізь кладку, наявність відкладень продуктів вилуговування, а також формування пустот за елементами конструкції труби;
- розкриття деформаційних швів (рис. 1.8, е) між секціями, яке виникає під впливом горизонтального тиску насипу та значних поздовжніх розтягувальних зусиль. Наслідком розкриття швів стають взаємні зсуви секцій, зволоження насипу, утворення пустот у зоні швів, відрив оголовка від основної частини труби, а також поява й розвиток тріщин у секціях і оголовках. Цей тип пошкоджень значно порушує експлуатаційні властивості труб і належить до категорії найбільш небезпечних, оскільки вимагає термінового виконання ремонтно-відновлювальних робіт;
- руйнування лотка труби (рис. 1.8, є), що виникає під впливом водного потоку або криги. Такі руйнування створюють умови для підмивання насипу в зоні труби, проникнення води під фундамент і потребують виконання ремонтно-відновлювальних заходів;
- замулювання русла (рис. 1.8, ж), що найчастіше виникає внаслідок осідання елементів труби, що створює загрозу для підтримання нормального гідравлічного режиму і потребує проведення робіт з очищення русла;
- пошкодження оголовків водопропускних труб (рис. 1.8, з) під час експлуатації, що може проявлятися у різних формах, таких як руйнування відкритків, підпірних стінок, тріщини та розриви кладки. Подібні дефекти виникають через значні розтягуючі зусилля, спричинені горизонтальним тиском насипу;
- вимивання ґрунту з-під труби та біля труби, розмивання насипу, які відбуваються внаслідок постійних паводкових впливів, і потребують проведення дорогих відновлювальних робіт.

Водопропускні труби є важливим елементом дорожньої інфраструктури. Для забезпечення їх надійної експлуатації необхідно застосовувати сучасні конструктивні рішення, здійснювати регулярний моніторинг технічного стану, аналізувати експлуатаційні пошкодження та враховувати реальні умови експлуатації під час проєктування труб.



a



б



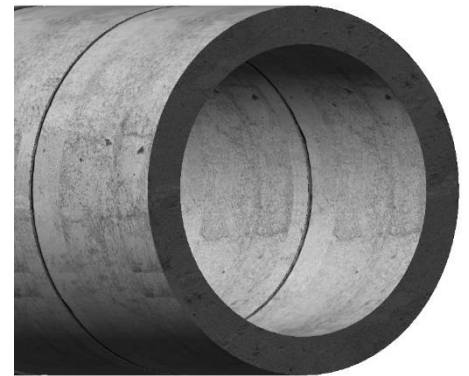
в



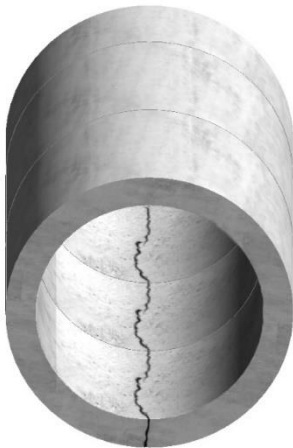
г



д



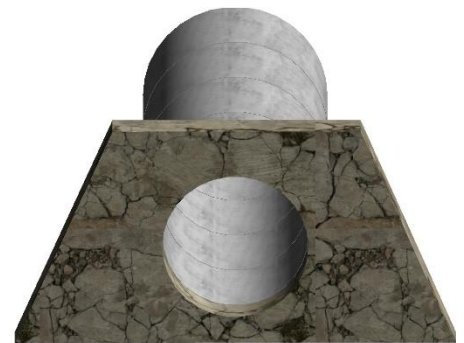
е



є



ж



з

Рис. 1.8. Основні пошкодження залізобетонних водопропускних труб:
a – вилугування бетону; *б* – просідання і крен секцій та оголовків труб;
в – поздовжні тріщини; *г* – поперечні тріщини; *д* – відшарування бетону;
е – розкриття деформаційних швів; *є* – руйнування лотка; *ж* – замулювання русла;
з – руйнування оголовка труби

1.3. Аналіз методів оцінювання напружено-деформованого стану водопропускних труб та залишкового ресурсу за визначальними параметрами технічного стану відповідно до нормативних документів

Оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) водопропускних залізобетонних труб є одним із ключових етапів визначення їхнього технічного стану. Від результатів цього оцінювання залежить безпечна експлуатація та довговічність конструкцій, що особливо важливо для споруд, які зазнають динамічних і статичних навантажень, зокрема дорожніх залізничних труб.

Проведення оцінювання НДС дозволяє визначити рівень залишкової міцності труб, врахувати вплив дефектів на несучу здатність і прогнозувати залишковий термін служби. Наприклад, Бліхарський Я. З., Солодкий С. Й., Іваницька Л. М., Бобало Т. В., Клименко Є. В., Полянський К. В. у своїх дослідженнях [101, 102, 103] підтверджують, що вплив дефектів, таких як тріщини, корозія арматури та зменшення захисного шару бетону, суттєво змінює НДС конструкції, що може призвести до її передчасного руйнування.

Дослідження НДС водопропускних труб дозволить обґрунтовано обирати матеріали для ремонту конструкцій, а також оптимізувати конструктивні рішення для їх відновлення. Практичне значення таких досліджень включає вдосконалення методів діагностики технічного стану та підвищення ефективності використання інженерних ресурсів.

Оцінювання НДС залізобетонних труб є одним із ключових завдань для забезпечення їх довговічності та безпечної експлуатації. Цей процес передбачає комплексну діагностику стану труб, вивчення їхньої поведінки під впливом експлуатаційних навантажень і визначення ефективних заходів для запобігання руйнуванню.

Основні завдання оцінювання НДС включають:

- *Визначення залишкової несучої здатності.* Оцінювання НДС дозволяє встановити, наскільки конструкція може витримувати навантаження з урахуванням її поточного стану, дефектів та пошкоджень. Це особливо важливо для труб, які

експлуатуються понад 50 років, адже матеріал зазнає старіння та втрати несучої здатності.

- *Прогнозування довговічності конструкцій.* Аналіз НДС дозволяє оцінити ймовірність появи критичних деформацій або тріщин, що сприяє визначенню залишкового ресурсу труб і оптимізації графіку ремонтних робіт. Завдяки таким прогнозам можна уникнути аварійних ситуацій.

- *Ідентифікація зон критичних напружень і деформацій.* Завдяки використанню сучасних експериментальних і числових методів оцінювання НДС можна локалізувати найбільш вразливі ділянки труб (наприклад, у місцях максимальних згинальних моментів), де ймовірність появи дефектів найбільша.

- *Розробка рекомендацій щодо підсилення.* На основі результатів оцінювання НДС визначаються заходи для відновлення міцності та функціональних характеристик труб. Це може включати вибір оптимальних матеріалів для ремонту або підсилення, таких як епоксидні смоли, металеві гільзи чи арматурні каркаси.

- *Забезпечення безпеки експлуатації.* Ретельний аналіз напружень і деформацій дає змогу уникати аварій через перевищення допустимих значень НДС, що є критично важливим для транспортної інфраструктури, особливо на залізничних і автомобільних дорогах.

Вирішення цих завдань базується на використанні сучасних інструментів і технологій, таких як натурні випробування, чисельне моделювання (наприклад, методом скінченних елементів), моніторинг у реальному часі за допомогою сенсорних систем і аналітичні методи прогнозування.

Цей підхід сприяє як забезпеченню безпеки транспортної інфраструктури, так і зниженню витрат на її утримання, що особливо актуально в умовах обмеженого фінансування ремонтних робіт.

Методи оцінювання НДС залізобетонних труб розрізняються за своїми характеристиками, такими як точність результатів, надійність, що забезпечується, та економічна доцільність їхнього застосування. Огляд цих аспектів дозволяє визначити, які методи є найбільш доцільними для застосування в конкретних умовах, залежно від поставлених завдань дослідження та експлуатаційних вимог.

Базуючись на підходах до аналізу, застосовуваних інструментах та характері проведення досліджень можна навести класифікацію методів оцінювання НДС:

- теоретичні методи;
- експериментальні методи;
- числові методи;
- інструментальні методи моніторингу;
- комбіновані методи.

Теоретичні методи базуються на аналітичних розрахунках, що враховують фізико-механічні властивості матеріалу та граничні умови. Вони дозволяють визначати напруження та деформації конструкцій у залежності від навантажень. Такі методи використовуються для оцінювання несучої здатності труб відповідно до ДБН [39, 104, 105] та ДСТУ [43, 106, 107].

Теоретичні розрахунки водопропускних труб виконуються з урахуванням їх здатності пропускати водний потік, а також на основі визначення міцності та стійкості самої конструкції труби. Для оцінювання цих характеристик застосовується метод граничних станів [19]. Згідно з ДБН В.2.3-14:2006 [39] існують дві основні групи граничних станів, які визначають межі, за яких конструкція або її окремі елементи не відповідають вимогам експлуатації:

- I група – коли виникає повна неможливість подальшого використання конструкцій або основ через втрату несучої здатності труби в цілому (втрата несучої спроможності ґрунтів основи, стійкості положення, міцності, стійкості форми, витривалості);

- II група – коли виникають перешкоди для нормальної експлуатації, що призводять до зниження проєктного терміну служби дорожньої труби (надмірні деформації конструкції, небезпечні коливання, виникнення тріщин або досягнення ними граничного розкриття або довжини, та інші загрозливі ознаки в утриманні та експлуатації).

Проведення розрахунків жорстких труб виконують за недеформаційною схемою. При їх проведенні враховують найбільш несприятливі, але реалістично можливі комбінації навантажень та зовнішніх впливів [45].

Під час аналізу НДС в поперечному перерізі розглядають окрему ділянку труби завдовжки 1 м, для якої проводять оцінювання всіх діючих навантажень (рис. 1.9, *а*) [45]. Такий підхід дозволяє детально визначити розподіл силових впливів і оцінити міцність та стійкість труби під дією експлуатаційних факторів.

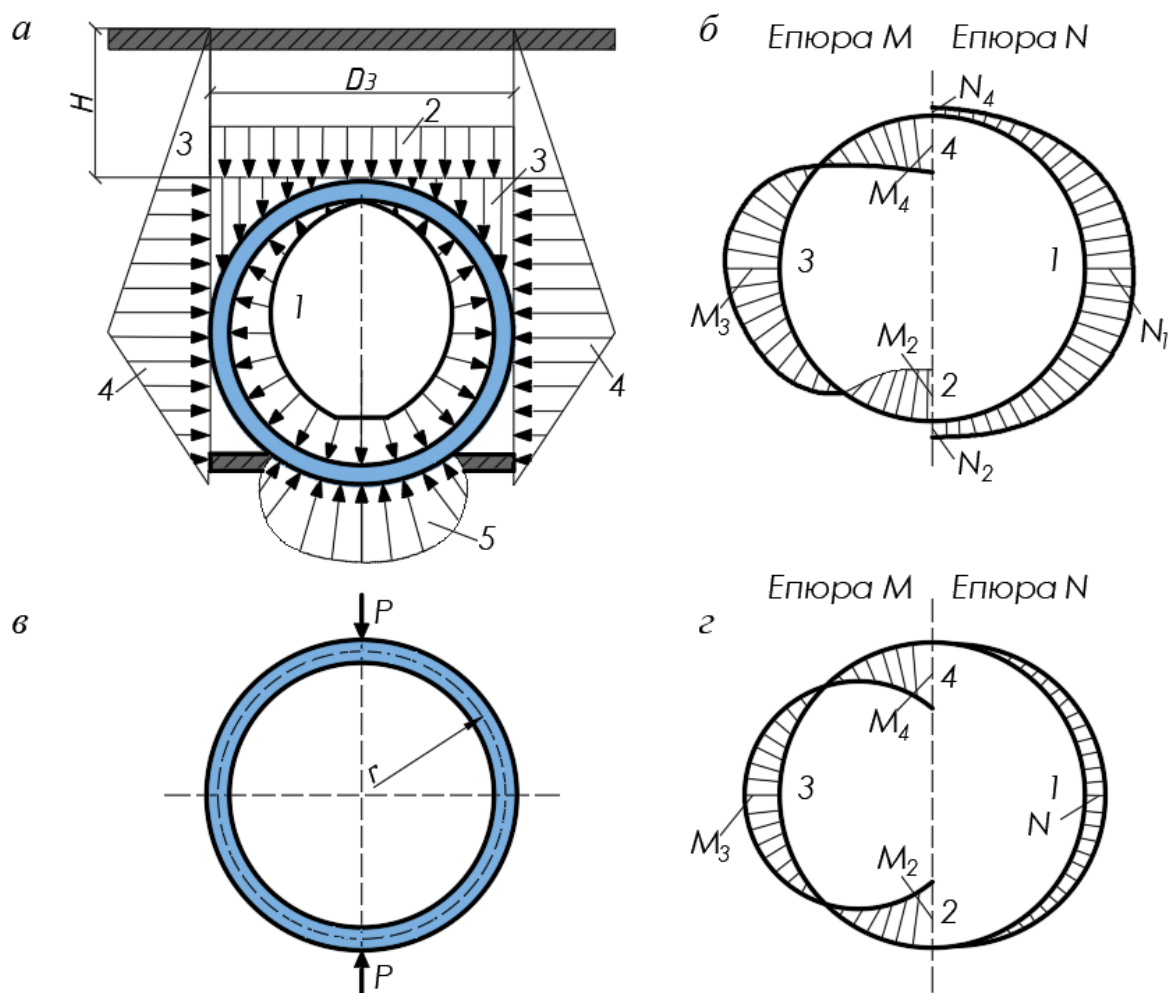


Рис. 1.9. Схеми статичного розрахунку круглих труб: *а* – схема навантажень; *б* і *г* – епюри згинальних моментів і поздовжніх сил N ; *в* – схема дії приведенного навантаження; 1 – вага рідини, що транспортується, 2 – вертикальний тиск ґрунту та надземного навантаження; 3 – тиск ґрунту в пазах; 4 – боковий тиск ґрунту

Відповідно до ДСТУ Б В.2.5-46:2010 [43] залежно від рівня несучої здатності, безнапірні залізобетонні труби поділяють на три основні категорії: I, II та III, які відповідають висоті шару ґрунтового насипу над трубою, що становить відповідно

2 м, 4 м і 6 м. Водночас, залежно від специфічних умов будівництва трубопроводів, допускається застосування труб, розрахованих на сприйняття навантажень, що відповідають ще вищим категоріям – IV та V. Такі труби здатні витримувати значно більшу висоту насипу, яка може досягати 8 м і навіть 10 м, забезпечуючи надійність конструкції в умовах значного навантаження.

Вагу труби, а також вагу води, що її заповнює, визначають, виходячи з заданих геометричних параметрів та об'ємної ваги залізобетону і води. Вертикальний тиск від ґрунту враховують у формі рівномірно розподіленого навантаження, спричиненого вагою засипного матеріалу [45]. Рівнодійну силу вертикального тиску розраховують за формулою:

$$G_r = k\gamma_r H D_3, \quad (1.1)$$

де k – узагальнений коефіцієнт тиску ґрунту, що враховує умови роботи труби в траншеї чи в насипі;

γ_r – об'ємна вага ґрунту;

H – відстань від вершини труби до поверхні ґрунту;

D_3 – зовнішній діаметр труби.

Під час визначення бокового тиску ґрунту враховують, що в нижній частині труби його значення є меншим, а в точці, де нахил дотичної дорівнює куту внутрішнього тертя ґрунту, тиск взагалі відсутній. З цієї причини епюру бокового тиску ґрунту приймають у вигляді зрізаної трапеції, де максимальне значення досягається на рівні горизонтального діаметра труби, а рівнодійну силу горизонтального тиску визначають, як площу цієї епюри (рис. 1.9, а):

$$E = (\gamma_r H D_3 / 4) / (3 + D_3 / H) \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ - 0,5 \cdot \varphi). \quad (1.2)$$

Статичний розрахунок залізобетонної труби здійснюється в межах пружної стадії із застосуванням методу сил. Трубу розглядають як тричі статично невизначене замкнуте кільце, яке перебуває у стані рівноваги під впливом навантажень та дії сумарних сил. Спочатку проводять окремий розрахунок для кожного виду

навантаження, після чого отримані зусилля алгебраїчно підсумовують відповідно до прийнятого поєднання впливів.

Сумарні епюри згинальних моментів та нормальних сил, що виникають у поперечному перерізі труби під впливом навантажень, які спричиняють сплющення її поперечного перерізу наведено на рис. 1.9, б.

Для спрощення статичного розрахунку, усі зовнішні навантаження, що впливають на конструкцію, зводять до двох рівних за величиною, але протилежно направлених лінійних навантажень, які діють уздовж вертикального діаметра труби. Такі навантаження отримали назву «приведених» (рис. 1.9, в). Перетворення зовнішніх навантажень у дві розрахункові зосереджені сили здійснюється із використанням спеціальних коефіцієнтів, визначених у нормативних документах.

Максимальні значення згинальних моментів у вертикальних перерізах складають (рис. 1.9, г):

$$M_2 = M_4 = 0,318 \cdot P \cdot r . \quad (1.3)$$

Максимальні значення згинальних моментів на бокових перерізах:

$$M_1 = M_3 = 0,182 \cdot P \cdot r . \quad (1.4)$$

Максимальні значення нормальних стискаючих сил діють у бічних перерізах і складають:

$$N = -0,5 \cdot P . \quad (1.5)$$

Розрахунок безнапірних залізобетонних труб проводять за міцністю та розкриттям тріщин. Оскільки допустиме утворення та розвиток тріщин у матеріалі труби, розрахунок її міцності здійснюється на основі методу граничної рівноваги, враховуючи можливість виникнення пластичних шарнірів.

Аналіз поведінки залізобетонних труб за схемою розрахунку наведеною на рис. 1.9 в, показує, що першими проявами руйнування є виникнення тріщин у верхній та нижній частинах труби. У міру зростання навантаження у цих зонах напруження в арматурі досягає границі текучості, що означає вичерпання несучої здатності

вертикальних перерізів та утворення пластичних шарнірів. Однак навіть після цього конструкція зберігає загальну стійкість, оскільки залишається один раз статично невизначеною.

Подальше збільшення навантаження призводить до того, що арматура в бічних зонах також досягає границі текучості, викликаючи появу ще двох пластичних шарнірів. У підсумку повне руйнування труби відбувається після утворення чотирьох пластичних шарнірів, що призводить до поділу труби на чотири малodeформовані сегменти, які перебувають у стані граничної рівноваги (рис. 1.10, а). Цей процес супроводжується перерозподілом згинальних моментів уздовж периметра труби, що зрештою визначає її поведінку в умовах граничного навантаження.

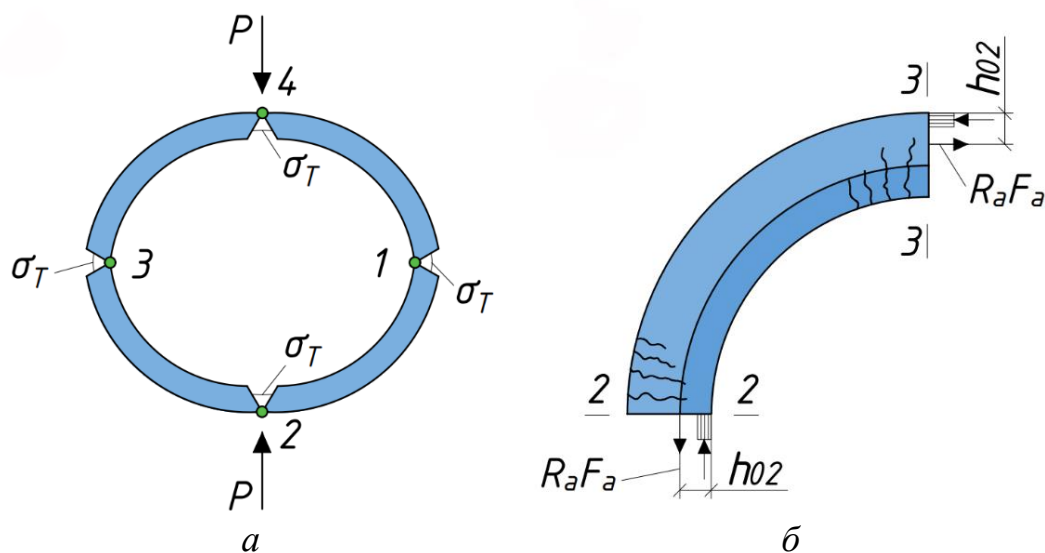


Рис. 1.10. Схеми до розрахунку безнапірних залізобетонних труб на міцність в стадії граничної рівноваги [45]: а – схема поділу труби на сегменти; б – переріз труби

Розрахунок безнапірних залізобетонних труб у стані граничної рівноваги виконується шляхом вирівнювання епюри згинальних моментів, отриманої в результаті аналізу труби в пружному стані. Це здійснюється пропорційно до несучої здатності перерізу конструкції.

При розрахунку враховується, що чотири найбільші за абсолютним значенням згинальні моменти, які формуються в перерізах 1, 2, 3, 4 (рис. 1.10, а), повністю

вичерпують несучу здатність відповідних перерізів. У такому випадку умова міцності при розрахунку з урахуванням приведених навантажень набуває наступного вигляду:

$$\sum M_i = P \cdot r \leq \sum M_{\text{ипр}} , \quad (1.6)$$

де $\sum M_i$ – сума абсолютних значень зовнішніх моментів, що визначені за пружною схемою роботи труби;

$\sum M_{\text{ипр}}$ – сума граничних моментів, які сприймає переріз при чистому згині.

Для довільного перерізу (рис. 1.10, б) використовується формула:

$$M_{\text{ипр}} = R_a \cdot F_a \cdot (h_{0i} - 0,5 \cdot x) \quad (1.7)$$

Оскільки бічний переріз труби позацентрово стиснений, потрібно врахувати вплив стискаючої сили на несучу здатність перерізу. Цей вплив можна врахувати за допомогою коефіцієнта $\nu = 1,1 \dots 1,2$. Тоді:

$$0,5 \cdot P \cdot r \leq M_{1\text{пр}} + \nu \cdot M_{2\text{пр}} . \quad (1.8)$$

При однаковій несучій здатності усіх перерізів ($M_{1\text{пр}} = M_{2\text{пр}}$), умова має вигляд:

$$0,5 \cdot P \cdot r \leq (1 + \nu) \cdot M_{\text{пр}} . \quad (1.9)$$

У такому випадку зовнішній вирівнюючий момент буде меншим, ніж виявлений за пружним станом та матиме наступний вигляд:

$$0,5 \cdot P \cdot r / (1 + \nu) = 0,25 \cdot P \cdot r . \quad (1.10)$$

Під час вибору спіральної арматури за методом граничної рівноваги задаються значенням F_a , визначають розташування каркаса в товщині стінки (h_{0i}) і перевіряють виконання умови міцності формула (1.9). Виконання розрахунку на стадії граничної рівноваги дає можливість зменшити витрати сталі порівняно з розрахунком у пружній стадії.

Розрахунок безнапірних труб на розкриття тріщин здійснюється з урахуванням нормативних зусиль, які визначаються на стадії пружної роботи конструкції. Виникнення тріщин не свідчить про втрату герметичності стінок труби, оскільки вони

не проходять наскрізь, а затухають у межах половини товщини стінки. Решта стінки, що залишається в стиснутому стані, забезпечує необхідну водонепроникність. Однак у випадках, коли труба зазнає циклічного заморожування й відтавання, як це часто трапляється в меліоративних системах, наявність тріщин може призвести до передчасного руйнування конструкції.

Залежно від діючих зусиль розрахунок ширини розкриття тріщин здійснюється у лотковій зоні як у згинальному елементі, а в бічних перерізах – як у позацентрово стиснутій ділянці [45].

Теоретичні методи дають змогу аналізувати поведінку конструкції на основі фізико-математичних моделей, однак часто нехтують складними реальними умовами, такими як вплив дефектів чи нерівномірність навантаження.

Основною перевагою таких методів є їх низька вартість, оскільки вони не потребують складного обладнання. Водночас точність результатів значною мірою залежить від коректності прийнятих припущень та моделей. Зазвичай теоретичні методи ігнорують низку реальних чинників, таких як нерівномірність матеріалу чи вплив старіння, що знижує їхню надійність, особливо для конструкцій із дефектами.

Експериментальні методи включають використання фізичної моделі конструкцій або зразків труб, які піддаються навантаженням у лабораторних умовах. Застосовуються індикатори переміщень, відеоспостереження, ультразвукові методи тощо.

Для проведення експериментальних випробувань безнапірних труб на європейському рівні застосовується стандарт EN 1916:2002 [108]. Цей стандарт визначає вимоги до безнапірних бетонних та залізобетонних труб, а також методи їх випробувань.

На міжнародному рівні існує стандарт ASTM C497-20e1 [109], що містить набір методів випробувань що використовуються для оцінювання експлуатаційних характеристик безнапірних залізобетонних труб, та забезпечує уніфіковані методи випробувань, що сприяють підвищенню якості та надійності бетонних конструкцій, які застосовуються в інфраструктурних проєктах.

В Україні експериментальні випробування безнапірних залізобетонних труб проводять відповідно до ДСТУ Б В.2.5-46:2010 [43] шляхом прикладання зосередженого навантаження F за допомогою металевої траверси в напрямку вертикального діаметру (рис. 1.11).

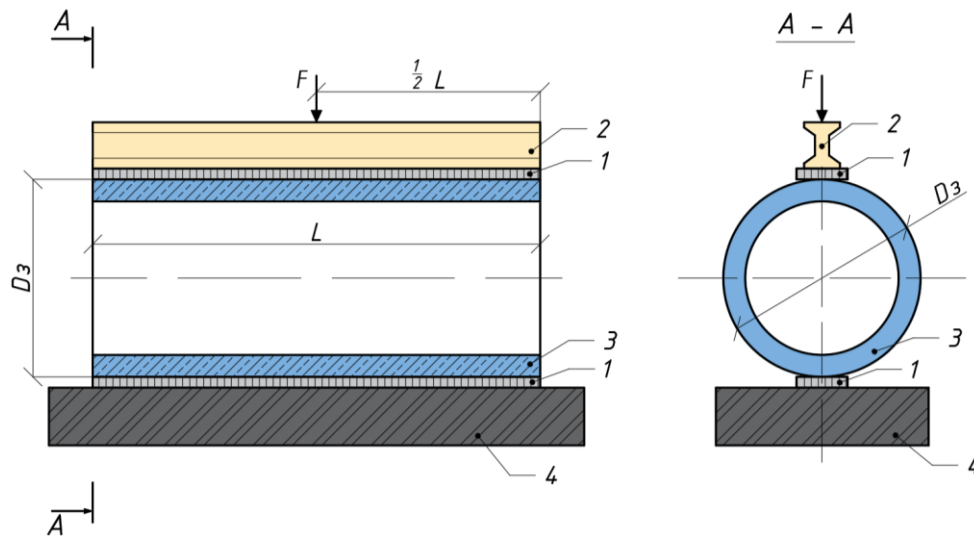


Рис. 1.11. Схема випробування безнапірної труби до ДСТУ Б В.2.5-46:2010 [43]: 1 – вирівнювальний розчин; 2 – металева траверса; 3 – труба; 4 – нерухома основа

Нижню частину труби слід оперти на нерухому основу через гумову підкладку. Навантаження задають ступінчато та рівномірно, поступово збільшуючи його протягом 2–3 хв.

Перевагою експериментальних методів є найвища точність, оскільки вони базуються на вимірюваннях реальних характеристик конструкції. За їх допомогою можна отримати точні дані про розподіл напружень і деформацій в елементах труб, особливо за нестандартних умов навантаження.

Недоліками є висока вартість та потреба у спеціалізованому обладнанні, таких як гідравлічні преси, індикатори та апаратура для збору даних. Експериментальні методи доцільно використовувати для підтвердження або калібрування теоретичних та числових моделей.

Чисельні методи засновані на використанні програмного забезпечення для моделювання НДС конструкцій. Найбільш популярним підходом є метод скінченних

елементів (МСЕ), який дозволяє моделювати складні умови навантажень і враховувати вплив дефектів.

Основи для розрахунку НДС труб методом скінченних елементів активно розвинулися протягом 1980-х років, адже в цей час значно поглибилося розуміння особливостей роботи водопропускних труб, що спричинило суттєвий прогрес у їхньому проектуванні та розрахунку.

У рамках досліджень, проведених для бетонної трубно-промисловості, Гегер і Макграт [110, 111, 112, 113] створили методику розрахунку армування бетонних труб. Вона ґрунтувалася на результатах численних випробувань, зокрема триточкового вигину, а також на випробуваннях плит і балок. Запропонований метод містив рівняння для оцінювання згинальної міцності, контролю утворення тріщин, визначення характеристик зсуву та радіального розтягу [18]. Розроблена методика стала основою для скінченно-елементної комп'ютерної програми Spiral Duct Manufacturers Association. Вона, в свою чергу, сприяла появі методу прямого розрахунку стандартного монтажу, призначеного для врахування взаємодії бетонних труб із ґрунтом у процесі проектування.

Основою методу прямого розрахунку стандартного монтажу є схема розподілу тиску Гегера, що відображає зміну навантаження на трубу залежно від характеристик зворотної засипки, зокрема її типу та ступеня ущільнення [114]. Особливістю цього підходу є детальніше моделювання розподілу навантаження під трубою з урахуванням жорсткості основи. На рис. 1.12 наведено порівняння цієї схеми з іншими поширеними спрощеними схемами.

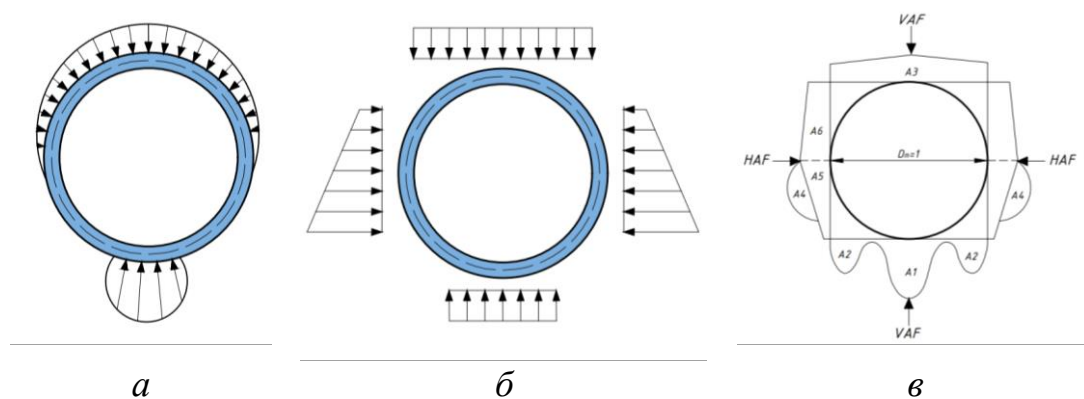


Рис. 1.12. Порівняння схем розподілу тиску на жорсткій трубі:

a – радіальний тиск; *б* – рівномірний тиск; *в* – тиск Гегера

Паулі Колісоя у роботі [115] провів серію досліджень за допомогою методу скінченних елементів для визначення впливу різних факторів на деформування труб під дією транспортного навантаження. Імітаційну модель перевірили за допомогою натурних випробувань на кількох реальних установках водопропускних труб у Фінляндії. Результати дослідження дозволяють зробити висновок, що глибина монтажу та якість матеріалу, що оточує трубу, мають значний вплив на її деформацію, тоді як вплив якості матеріалу самої труби та типу шини, що передає навантаження від коліс, є значно меншими.

Чисельні методи, зокрема МСЕ, забезпечують високу точність за рахунок можливості моделювання складної геометрії, матеріалів та умов навантаження. Вони є надзвичайно ефективними для оцінювання НДС труб із урахуванням реальних фізико-механічних характеристик матеріалу та пошкоджень. Проте ці методи потребують потужних обчислювальних ресурсів та високої кваліфікації інженерів для виконання розрахунків, що збільшує їх вартість. У довгостроковій перспективі числові методи є економічно вигідними, оскільки дозволяють зменшити кількість експериментальних досліджень.

Інструментальні методи моніторингу використовуються для контролю НДС труб безпосередньо в експлуатаційних умовах та включають методи неруйнівного контролю. До таких методів належать оптичні прилади, акустична емісія, вібраційна діагностика, радіаційний контроль, тензометрія тощо. Вони дозволяють виявляти дефекти, визначати товщину елементів чи їхню міцність. Точність цих методів залежить від технології: ультразвук забезпечує високу точність для виявлення тріщин, тоді як магнітний метод обмежений лише поверхневими дефектами. Вартість цих методів помірна, і вони є зручними для регулярного моніторингу.

До інструментальних методів можна віднести сучасні системи моніторингу, оскільки вони використовують спеціалізоване обладнання, зокрема датчики, прилади для збору й аналізу даних, а також програмне забезпечення для візуалізації та інтерпретації результатів. Ці системи забезпечують автоматизований і постійний контроль стану конструкцій у реальному часі, дозволяючи отримувати точну інформацію про НДС труб під час їхньої експлуатації. Вони поєднують традиційний

підхід до інструментальних вимірювань із сучасними цифровими технологіями для забезпечення високої надійності оцінювання.

Сучасні системи моніторингу дозволяють вести безперервний контроль стану конструкцій у реальному часі. Вони забезпечують найвищу надійність завдяки регулярному збору даних, що дозволяє виявляти тенденції зміни НДС. Однак впровадження таких систем є затратним і виправдане лише для критично важливих конструкцій, таких як мости чи магістральні комунікації.

Перевагою інструментальних методів є швидкість і безпечність обстеження без пошкодження конструкції, однак недоліком є складність інтерпретації результатів, особливо для багат шарових або дефектних конструкцій.

Комбіновані методи передбачають поєднання кількох вищезазначених підходів для підвищення точності та достовірності отриманих даних.

Кожен з методів оцінювання НДС має свої переваги та обмеження і використовується залежно від завдань дослідження, економічних ресурсів і необхідної точності.

Теоретичні методи є доцільними на етапах попереднього аналізу, чисельні — для детального моделювання, а експериментальні — для підтвердження результатів, отриманих за допомогою попередніх методів. Інструментальні методи ідеально підходять для оцінювання стану труб в експлуатації. Оптимальним є інтегрований підхід, який комбінує переваги кількох методів для досягнення високої ефективності.

Виходячи з проведеного аналізу методів дослідження НДС можна зробити висновок, що важливим напрямком досліджень є розробка інтегрованих методів, що поєднують теоретичні, числові та експериментальні підходи для точнішого оцінювання НДС залізобетонних труб.

Визначення технічного стану та залишкового ресурсу водопропускних залізобетонних труб

Технічний стан та залишковий ресурс залізобетонних труб, що перебувають в експлуатації, встановлюють у результаті проведення обстежень згідно ДСТУ Б В.2.3-

24:2009 [55]. Цей ресурс оцінюється у відсотках від нормативного (проектного) терміну служби.

Обстеження залізобетонних труб спрямовані на виявлення різноманітних дефектів, зокрема наявності тріщин, відколів бетону, ділянок із недостатньою товщиною захисного шару, ознак вологи у швах між елементами, вологих плям на бетонних поверхнях, відшарування захисного покриття, зон з оголеною арматурою та слідами її корозії та інших дефектів.

На підставі результатів обстеження визначають, до якого з п'яти експлуатаційних станів належить труба, а також надають рекомендації щодо подальшої експлуатації або необхідності її заміни.

Значення залишкового ресурсу відповідно до ДСТУ Б В.2.3-24:2009 [55], у залежності від експлуатаційного стану, наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Залишковий ресурс дорожньої залізобетонної труби від нормативного терміну експлуатації відповідно до ДСТУ Б В.2.3-24:2009 [55]

Номер експлуатаційного стану	Назва експлуатаційного стану	Залишковий ресурс, %
1	Справний	95
2	Обмежено справний	82
3	Працездатний	61
4	Обмежено працездатний	36
5	Непрацездатний	6

Класифікацію, ознаки експлуатаційних станів залізобетонних труб та заходи щодо їх подальшої експлуатації згідно ДСТУ Б В.2.3-24:2009 [55] наведено в табл. 1.3.

Після обстеження визначають загальний технічний стан труби, а також надають висновки і рекомендації щодо видів та об'ємів ремонтних робіт. Аналіз залишкового ресурсу дозволяє оцінити доцільність реконструкції, критерієм якої є забезпечення терміну подальшої експлуатації не менше 20 років за рахунок наявного ресурсу основних несучих елементів.

Таблиця 1.3

Класифікація, ознаки експлуатаційних станів труб та експлуатаційні заходи згідно ДСТУ Б В.2.3-24:2009 [55]

Експлуатаційний стан	Назва експлуатаційного стану	Зміни форми і ушкодження	Експлуатаційні заходи	Мета заходів	Виконувані роботи
1	Справний	Експлуатована труба зі щільними з'єднаннями в швах без отворів і тріщин. Суцільна без ушкоджень поверхня бетону. Повне вирівнювання секцій	Огляд у терміни відповідно до ДСТУ Б В.2.3-24:2009	Збереження труби у справному стані. Усунення Незначних пошкоджень	Відтавання замороженої труби. Усунення рослинності. Видалення ґрунтових наносів і уламків
2	Обмежено справний	Досконале взаємне розташування секцій. Наявні незначні порушення щільності швів. Невелика фільтрація в з'єднаннях всередину і зовні. Незначне місцеве роздрібнення бетону. Волосяні тріщини в бетоні. Місцеві розшарування бетону. Ушкодження бетону на глибину до 6 мм	Ремонт	Ліквідація дрібних ушкоджень і перешкоджання подальшому руйнуванню	Ущільнення швів. Локальний ремонт бетонних поверхонь. Вирівнювання лотків. Очищення лотка від наносів і уламків твердих порід
3	Працездатний	Незначні порушення вирівнювання секцій. Нещільні з'єднання в швах. Значна внутрішня фільтрація. Множинні тріщини в бетоні з розкриттям до 3 мм. Помірне розшарування. Відколювання бетону і оголювання арматури. Корозія арматури. Лушення бетону на глибину до 12 мм. Порушення швів поміж ланками труби. Поява множинної плісняви. Відхили площі укріплення вхідного та вихідного лотків від проектних розмірів	Капітальний ремонт	Максимальне надання споруді експлуатаційних властивостей, близьких до проектних	Заміна покриття лотка. Виправлення оголовків і відкритків. Вирівнювання секцій. Відновлення арматури, враженої корозією. Повне відновлення ушкоджених бетонних поверхонь. Ремонт або заміна люків і шахт оглядових колодязів

Експлуатаційний стан	Назва експлуатаційного стану	Зміни форми і ушкодження	Експлуатаційні заходи	Мета заходів	Виконувані роботи
4	Обмежено працездатний	Відхили поздовжнього ухилу або вертикальних позначок вхідного та вихідного лотків від проектних розмірів. Значне взаємне зміщення секцій труби. Зсунення оголовків. Множинні протікання всередину. Розкриття стиків понад 30 мм і руйнування матеріалу швів. Значна фільтрація всередину і зовні. Суцільна пліснява. Значні ділянки оголеної арматури з її корозійним ураженням на глибину до третини діаметра. Лушення бетону на глибину половини товщини стінки	Відновлення	Поліпшення або повна заміна ушкоджених елементів труби. Повне відновлення проектних експлуатаційних якостей труби	Додавання, ремонт або заміна ушкоджених конструкцій. Створення додаткової внутрішньої оболонки по всій довжині металевої труби. Збільшення довжини труби в разі потреби. Встановлення захисних решіток
5	Непрацездатний	Часткове або повне руйнування труби. Наскрізні ушкодження стінок. Корозійне руйнування оголеної арматури. Закриття руху	Реконструкція або заміна	-	Спорудження нових конструкцій труби, можливо з заміною матеріалу. Зміна розташування труби в насипу. Підвищення міцності і перепускної спроможності проти попередніх

1.4. Огляд і класифікація методів підсилення водопропускних залізобетонних труб та доцільність застосування відомих технологій відновлення

Відновлення пошкоджених залізобетонних труб в умовах експлуатації є одним із ключових завдань забезпечення їхньої довговічності та безпечної роботи. Цей процес можна реалізувати двома основними методами: повною заміною конструкції або виконанням підсилення існуючої труби.

Повна заміна передбачає демонтаж пошкодженої труби та встановлення нової конструкції (рис. 1.13–1.14). Цей метод часто використовується, якщо пошкодження критичні, а відновлення економічно недоцільне або технічно неможливе. Проте така процедура супроводжується значними витратами часу та коштів, зокрема на земляні роботи, транспортування, а також може призводити до тривалого припинення руху транспорту.



Рис. 1.13. Заміна водопропускної труби у м. Ківерці на автомобільній дорозі Т-03-09 Дубечне–Стара Виживка–Турійськ–Рожище–Ківерці–Піддубці [116]



Рис. 1.14. Заміна водопропускних труб у с. Лопушне, на автомобільній дорозі Т-20-13 [116]

Альтернативою є підсилення існуючої труби, що дозволяє зберегти основну конструкцію, усунувши дефекти та підвищивши її несучу здатність. За останній час з'явилася значна кількість нових вітчизняних та зарубіжних матеріалів і технологій, що дозволяють не тільки призупиняти розвиток дефектів і несправностей залізобетонних конструкцій, але і проводити їх підсилення з метою отримання необхідних експлуатаційних характеристик [117]. До основних методів підсилення належать «гільзування», «відновлення на місці», напilenня та «розрив труб» [118].

При використанні *методу гільзування* (рис. 1.15) нова труба, яка має менший діаметр, ніж існуюча (основна) труба, вставляється всередину вже наявної труби. Простір між стінками основної труби та вставленою гільзою заповнюється ремонтною сумішшю. Після затвердіння суміші конструкція готова до експлуатації. Як гільзу можна використовувати практично будь-який матеріал труб, проте найпоширенішими є труби з поліетилену високої щільності, полівінілхлориду, центрифуговано-литих склопластикових труб, а також металеві гофровані труби.

Вартість даного методу залежить від конкретних геометричних параметрів труби, що вимагає підсилення, її діаметру та довжини.

Перевагами даного методу є ефективне відновлення пошкоджених труб, збільшення несучої здатності до проєктної або її підвищення, мінімізація земляних робіт, швидкість виконання та можливість проводити ремонтні заходи без зупинки руху по споруді. Основними недоліками є зменшення діаметру водопропускної труби та необхідність двох точок доступу.



Рис. 1.15. Відновлення труби методом гільзування із використанням поліетиленової труби високої щільності [119]

Метод «відновлення на місці» (рис. 1.16) або Cured in Place Pipe (CIPP) передбачає використання гнучкого матеріалу труби, насиченого термореактивною полімерною смолою, який вводиться в основну трубу. Цей матеріал розширюється за допомогою стисненого повітря. Після цього термореактивна смола полімеризується (твердне), забезпечуючи зчеплення нової труби зі стінками основної труби. Гнучкий матеріал, що використовується для цієї технології, виготовляється зі скловолокна, посиленого термореактивною смолою. Очікуваний термін служби технології складає 50 років [120].

Перевагами методу є мінімізація земляних робіт, швидкість виконання, стійкість до корозії та герметичність нової труби, а також можливість проведення відновлення без зупинки руху. Основними недоліками є висока вартість, яка

зумовлена використанням важкої будівельної техніки та залученням технічних фахівців, а також низька несуча здатність. Крім того, складно повністю очистити основну трубу від корозійних відкладень, що може вплинути на якість зчеплення між новою та основною трубою, а затвердіння нової гнучкої труби займає від 12 до 24 год.



Рис. 1.16. Процес відновлення труби методом «відновлення на місці» [121]

Метод нанесення покриттів (рис. 1.17) за допомогою напilenня на внутрішню поверхню труб використовує розчини армовані подрібненими волокнами, що стало поширеною практикою для ремонту кородованих металевих водопропускних труб з середини 1980-х років. Окрім цього, в останнє десятиліття набули популярності й інші матеріали, зокрема полімерні покриття, такі як епоксидні смоли та поліуретан [122]. Ця технологія застосовується до всіх типів і форм водопропускних труб. Проте значною проблемою покриття, що наноситься напilenням, є тріщини. Крім того, нове покриття втрачає свою товщину через стирання від потоку води [120]. Цей метод не забезпечує комплексного ремонту для існуючих кородованих труб, а доступ всередину труб малих діаметрів є складним.



Рис. 1.17. Відновлення верхнього шару труби шляхом нанесення покриття [123]

Метод «розрив труб» (рис. 1.18) є ще однією безтраншейною технологією заміни труб. Пошкоджена труба розривається за допомогою спеціального інструменту, який розбиває її на фрагменти, одночасно протягуючи нову заміну труби без необхідності копати траншею. Розрив труб здійснюється за допомогою статичного або пневматичного тягового механізму [124]. Ця технологія найкраще підходить для бетонних труб, оскільки розривати гофровані металеві або залізобетонні труби значно складніше. Для підсилення гофрованих металевих труб за допомогою методу «розриву труб» потрібне спеціальне різальне обладнання.

Перевагами даного методу є повна заміна труби, збереження або збільшення діаметра та швидкість виконання. Основними недоліками є можливість осідання та підняття ґрунту, особливо в щільних пісках, висока вартість обладнання, обмеження за типом ґрунту, ризик пошкодження комунікацій та можливість відновлення труб лише невеликих діаметрів. Оптимальні результати досягаються для діаметрів від 150 мм до 800 мм. Для труб понад 1200 мм застосування цього методу значно ускладнюється через необхідність дуже потужного розширювача та високий ризик осідання ґрунту. Крім того, метод «розриву труб» не застосовується, коли спостерігається просідання труби.

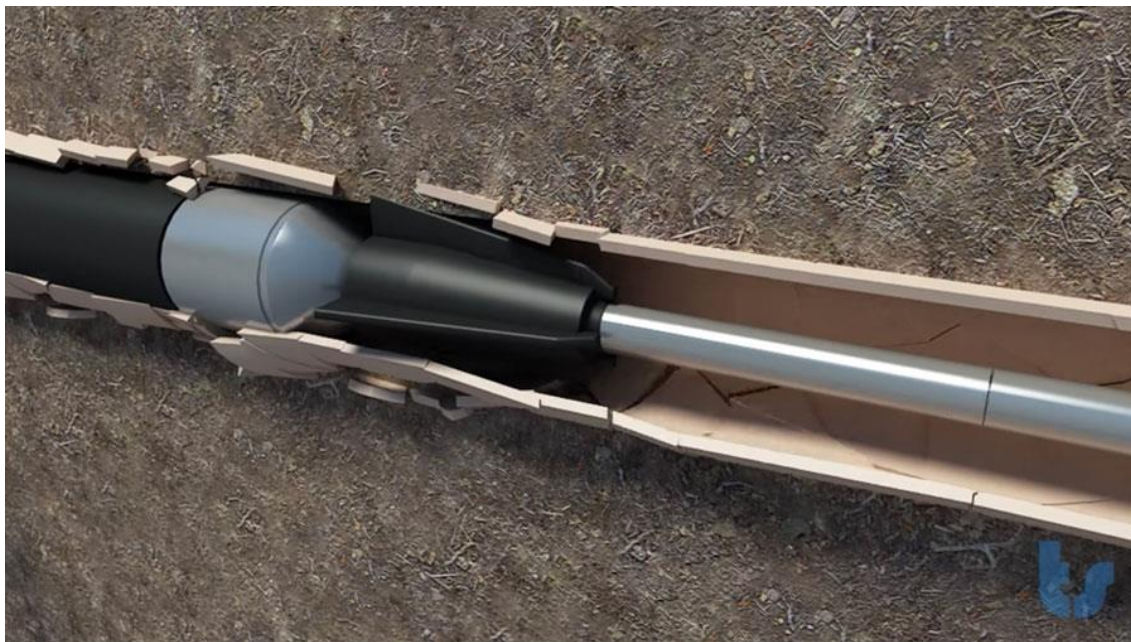


Рис. 1.18. Ілюстрація методу «розрив труб» для відновлення трубопроводів [125]

Виконання підсилення труб має низку переваг над проведенням їх повної заміни, зокрема менші фінансові витрати, скорочення часу проведення робіт та мінімізація впливу на прилеглу інфраструктуру. Підсилення особливо актуальне для споруд, що зазнали помірних пошкоджень або втратили частину своєї несучої здатності через довготривалу експлуатацію.

Вибір методу підсилення або заміни водопропускних залізобетонних труб залежить від ступеня пошкодження труби, технічних умов експлуатації, а також економічної доцільності, та повинен базуватися на об'єктивній оцінці їхнього технічного стану. Згідно з ДСТУ Б В.2.3-24:2009 [55], стан труб класифікується за п'ятьма експлуатаційними станами, що враховують наявність дефектів, ступінь пошкодження конструкції та можливість подальшої експлуатації (див. п. 1.3).

Оцінювання експлуатаційного стану дозволяє визначити оптимальні заходи для відновлення або заміни труби. Зокрема, для труб, що відповідають першому або другому експлуатаційному стану, можуть застосовуватися локальні методи ремонту, такі як нанесення захисних покриттів або часткове відновлення бетонного захисного шару. Для труб із помітним погіршенням характеристик (третій експлуатаційний стан) доцільне використання технологій гільзування, методу «відновлення на місці» або армування внутрішньої поверхні композитними матеріалами. У випадках значних

пошкоджень (четвертий експлуатаційний стан) підсилення може бути здійснене за використанням методу гільзування. Якщо труба перебуває у критичному стані (п'ятий експлуатаційний стан), її подальша експлуатація є небезпечною, а проведення заходів підсилення не завжди доцільне, що обґрунтовує необхідність повної заміни конструкції.

Таким чином, класифікація експлуатаційних станів згідно з ДСТУ Б В.2.3-24:2009 [55] є важливим етапом прийняття рішень щодо доцільності підсилення труб. Вона дозволяє визначити оптимальну технологію відновлення, мінімізувати витрати та забезпечити довговічність конструкцій, що експлуатуються.

Аналіз існуючих методів підсилення водопропускних залізобетонних труб показав, що кожен із них має як переваги, так і певні обмеження. Серед них гільзування вирізняється найбільшою ефективністю завдяки поєднанню високої конструктивної надійності, довговічності та універсальності.

Однією з ключових переваг методу гільзування є можливість відновлення та підсилення труби без демонтажу основної. Це значно зменшує об'єм земляних робіт, скорочує тривалість ремонту й мінімізує вплив на транспортні потоки та прилеглу інфраструктуру. У порівнянні з методом «розриву труб», який вимагає повного руйнування старої труби, або «відновлення на місці», що має високі вимоги до підготовки поверхні й не забезпечує суттєвого підвищення міцності, метод гільзування демонструє значно кращу ефективність.

Конструктивна надійність методу пояснюється тим, що нова труба (гільза), встановлена всередині старої, разом із заповненням кільцевого зазору ремонтною сумішшю створює комбіновану багатошарову систему. Це дозволяє рівномірно перерозподіляти навантаження, зменшувати локальні напруження та суттєво підвищувати несучу здатність конструкції. На відміну від напилюваних полімерних і цементних покриттів, що можуть втрачати свою товщину через абразивну дію потоку води, гільзування забезпечує довговічний захист труби від подальшої деградації.

Ще однією важливою перевагою є гнучкість у виборі матеріалу для гільзи. Це можуть бути полімерні труби, металеві гофровані конструкції або навіть

залізобетонні елементи, що дозволяє адаптувати метод під конкретні умови експлуатації.

Таким чином, метод гільзування є найбільш ефективним і перспективним методом підсилення водопропускних залізобетонних труб із зниженими міцнісними характеристиками, оскільки забезпечує комплексне вирішення проблеми відновлення несучої здатності конструкції, має широкі можливості адаптації до різних умов експлуатації та дозволяє значно подовжити термін служби труб. Це створює підґрунтя для подальшого вдосконалення даного методу.

1.5. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза. Мета і задачі дослідження

Одними з наймасовіших типів транспортних споруд є залізобетонні водопропускні труби. Тривала експлуатація, вплив змінних навантажень від руху транспорту, а також агресивний вплив навколишнього середовища призводять до розвитку дефектів і поступового зниження їх несучої здатності. Відсутність своєчасного підсилення або відновлення труб може спричинити аварійне руйнування, що призведе до значних економічних збитків і порушення транспортного сполучення.

Існуючі методи підсилення залізобетонних труб мають як переваги, так і недоліки. Наприклад, метод гільзування дозволяє продовжити термін експлуатації конструкцій, однак недостатньо досліджено його вплив на напружено-деформований стан труби. Зокрема, залишається відкритим питання щодо ефективності цього методу підсилення в умовах дії змінних навантажень, його впливу на перерозподіл напружень у конструкції та довговічність відновлених труб.

У зв'язку з цим важливим завданням є вдосконалення існуючих методів підсилення залізобетонних водопропускних труб шляхом оптимізації конструктивних рішень, підбору матеріалів і технологічних параметрів. Окрім цього, актуальним є обґрунтування доцільності застосування для ремонту труб альтернативних технологій відновлення, таких як ін'єктування, що дозволяє відновлювати цілісність пошкоджених конструкцій та підвищувати їхню несучу

здатність. Комплексний підхід до підсилення, що поєднує різні методи залежно від характеру пошкоджень, сприятиме підвищенню довговічності труб та забезпеченню їхньої надійної експлуатації.

На підставі проведеного аналізу висунуто **наукову гіпотезу** про вдосконалення методу гільзування та застосування альтернативних технологій відновлення залізобетонних водопропускних труб із зниженими міцнісними характеристиками, а також про доцільність оцінювання НДС підсилених труб.

Метою роботи є відновлення та підвищення несучої здатності і довговічності водопропускних залізобетонних труб.

Досягнення поставленої мети здійснюється на основі вирішення наступних науково-технічних завдань за розробленою структурно-логічною схемою досліджень, наведеною в табл. 1.4.

1. Провести аналіз інженерно-конструктивних методів підвищення несучої здатності водопропускних труб в експлуатаційних умовах.

2. Розробити ефективні методи і технологію підвищення несучої здатності пошкоджених залізобетонних труб.

3. Виконати розрахунок напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб методом скінченно-елементного аналізу із врахуванням дії силових навантажень та температурних впливів.

4. Розвинути математичну модель напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб при дії температурних впливів та виконати відповідні дослідження.

5. Експериментально дослідити роботу підсилених різними методами водопропускних залізобетонних труб на стадії експлуатаційних навантажень, а також у граничному стані за міцністю для доведення ефективності розроблених методів.

6. Провести порівняльний аналіз результатів експериментальних випробувань і теоретичних досліджень підсилених водопропускних залізобетонних труб.

7. Розробити рекомендації для розрахунку та проєктування підсилення пошкоджених залізобетонних труб та визначити техніко-економічну ефективність.

Блок-схема досліджень

№	Мета	Форма досягнення	Результат
1	Аналіз методів оцінювання напружено-деформованого стану та залишкової несучої здатності водопропускних труб	Огляд літературних джерел, нормативних документів, класифікація параметрів технічного стану за ДСТУ	Визначення критеріїв оцінювання технічного стану залізобетонних водопропускних труб
2	Обґрунтування методів підсилення залізобетонних труб	Аналіз існуючих технологій, узагальнення практичного досвіду, оцінювання переваг і недоліків методів	Виділення найбільш ефективних методів підсилення для їх подальшого вдосконалення
3	Розробка вдосконалених методів підсилення труб, обґрунтування використання ін'єктування та додавання арматурного каркасу для підвищення несучої здатності конструкції	Теоретичний аналіз, обґрунтування вибору матеріалів і технологічних параметрів	Вдосконалення відомих технологій підсилення залізобетонних труб та використання ін'єкційного методу для відновлення несучої здатності залізобетонних труб
4	Теоретичне обґрунтування напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб	Використання програмного забезпечення для числового аналізу	Побудова моделей, що описують поведінку труб після підсилення та оцінювання їх ефективності
5	Експериментальна верифікація напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб	Проведення лабораторних випробувань труб, підсилених пропонованими методами, порівняння результатів із теоретичними даними	Визначення впливу підсилення на деформації труб та їхню граничну несучу здатність
6	Формування рекомендацій щодо вибору методу підсилення та економічна ефективність запропонованих рішень	Порівняльний аналіз отриманих експериментальних та числових результатів	Розробка рекомендацій щодо вибору методів підсилення залежно від типу пошкоджень та експлуатаційних умов

Висновки до розділу 1

На основі аналізу технічного стану та інженерно-конструктивних методів підвищення несучої здатності водопропускних труб в експлуатаційних умовах можна зробити наступні висновки:

1. Проаналізовано технічний стан водопропускних залізобетонних труб на автомобільних та залізничних шляхах України. Встановлено, що 27 % труб мають різного виду дефекти та потребують проведення ремонтних заходів або заміни.

2. Визначено, що основними причинами пошкоджень залізобетонних водопропускних труб є тривала експлуатація, вплив змінних транспортних навантажень, агресивні дії навколишнього середовища та недоліки проектування або будівництва.

3. Проаналізовано методи оцінювання технічного стану водопропускних труб, зокрема відповідно до нормативних документів, та наведено класифікацію експлуатаційних станів конструкцій. Встановлено, що для вибору оптимального методу відновлення необхідно враховувати ступінь пошкоджень, конструктивні особливості труби та умови її експлуатації.

4. Розглянуто основні методи підсилення та відновлення водопропускних залізобетонних труб. Визначено переваги та недоліки існуючих технологій. Виявлено, що сучасні технології мають потенціал до подальшого вдосконалення шляхом оптимізації конструктивних рішень та використання нових матеріалів.

5. Сформульовано наукову гіпотезу, яка передбачає, що підвищення несучої здатності та довговічності водопропускних залізобетонних труб можливе за рахунок удосконалення існуючих методів підсилення та впровадження нових технологій.

6. На основі проведеного аналізу сформульовано мету й завдання дослідження, які передбачають обґрунтування та вдосконалення існуючих методів підсилення труб, визначення їхньої ефективності за допомогою теоретичних та експериментальних досліджень, а також розробки рекомендацій щодо вибору оптимальних технологій відновлення залежно від характеру пошкоджень.

РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК І РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПОШКОДЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ

2.1. Аналіз існуючого досвіду і теоретичні дослідження підсилення залізобетонних труб методом гільзування

Метод гільзування є найбільш поширеним методом підсилення залізобетонних труб та широко застосовується у країнах Європейського Союзу, де вже накопичено значний досвід у його використанні [126]. Особливо активно його застосовують у таких країнах, як Польща, Швеція, Італія та Чехія.

Даний метод відноситься до сучасних інженерних технологій, розроблених з метою підвищення надійності та відновлення несучої здатності залізобетонних споруд. Його впровадження дозволяє значно подовжити експлуатаційний термін конструкцій без необхідності повного демонтажу та заміни, що є особливо важливим при обмежених фінансових та часових ресурсах. Основна ідея цього методу полягає у встановленні нової труби меншого діаметра (гільзи) всередину залізобетонної труби, що потребує підсилення, з подальшим заповненням простору між конструкціями ремонтною сумішшю (рис. 2.1.).



Рис. 2.1. Схема підсилення залізобетонної труби методом гільзування:

- 1 – існуюча дефектна залізобетонна труба; 2 – металева труба (обойма);
- 3 – шар суміші між існуючою залізобетонною трубою та новою металевою

Багато наукових праць європейських дослідників присвячено темі підсилення конструкцій методом гільзування. Як зазначає автор у роботі [128], оптимальним рішенням для зміцнення споруд є застосування методу гільзування, оскільки цей метод забезпечує високу ефективність і довговічність, знижуючи потребу в капітальних ремонтах або заміні старих конструкцій.

На відміну від традиційних методів, що передбачають демонтаж старих конструкцій та монтаж нових, технологія гільзування дозволяє ефективно відновити експлуатаційні характеристики труб без необхідності масштабних будівельних робіт [127]. Такий підхід значно зменшує фінансові витрати, скорочує тривалість ремонту та мінімізує вплив на навколишню інфраструктуру, що робить його дуже популярним у країнах Європи для зміцнення різноманітних інфраструктурних об'єктів (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Ремонт водопропускної труби методом гільзування в м. Жамберк, Чехія [129]: *а* – до ремонту; *б* – після ремонту

Завдяки своїй універсальності та ефективності метод гільзування може бути використаний для таких об'єктів як труба, арка або каркасна конструкція, яка має геометрію, що підходить для цього методу підсилення. Вибір методу монтажу залежить від наявності простору біля об'єкта, типу конструкції для підсилення, монтажних умов та фінансових витрат. Важливо, що цей метод може зменшити поперечний переріз водопропускної труби, але це не завжди призводить до погіршення її гідравлічних властивостей. Ця технологія активно використовується

для зміцнення дорожніх водопропускних труб та малих мостів, особливо склепінчастих. Важливо, що виконання робіт за цією технологією не потребує повного перекриття руху транспорту (рис. 2.3), що дозволяє зберігати безперервність транспортного потоку навіть під час проведення ремонтних заходів.

У результаті підсилення гільзуванням створюється багатошарова конструкція, що складається з існуючого об'єкта, що підлягає підсиленню, шару суміші, якою заповнено конструктивний зазор, та нової труби. Така трикомпонентна структура забезпечує значне підвищення несучої здатності труби та її стійкість до динамічних і статичних навантажень.



а



б

Рис. 2.3. Ремонт споруд методом гільзування під час руху рухомого складу [129]:

а – на ділянці Колюшкі – Ченстохова № 20 км 173,585 в Польщі; *б* – на ділянці Хомутов – Хеб на км 152,853 в Чехії

В дослідженні [130] автор детально аналізує досвід підсилення водопропускних труб у Польщі, серед яких одним із ключових методів був використаний метод гільзування. Зокрема, йдеться про національну дорогу № 4, що з'єднує міста Краків і Ряшів, а саме її ділянку між Краковом і Тарговиськом. Ця ділянка, яка перебувала у стані реконструкції, викликала численні скарги серед водіїв через труднощі проїзду. Водночас, завдяки проведенню ретельного аналізу, було обрано оптимальні підходи для відновлення інфраструктури, що відповідають сучасним вимогам до навантажень на дорожнє покриття.

Щоб уникнути значних затримок у русі або потреби організовувати об'їзди, інженери вирішили відмовитися від повної заміни трьох дефектних труб. Для однієї з них застосували метод гідравлічного домкрата, а для двох інших — підсилення існуючих конструкцій методом гільзування через установку металевих гофрованих елементів всередині старих труб. Це рішення дозволило забезпечити довговічність відрновлених труб при мінімальних перешкодах для дорожнього руху.

У США багато відомств успішно застосовують метод гільзування для реконструкції пошкоджених трубопроводів. Зокрема, у 1983–1984 рр Департамент транспорту штату Оклахома здійснив відрновлення понад 40 водопропускних труб, що зазнали руйнування внаслідок корозії. А у 2007 р. Департамент транспорту штату Делавер відрновив залізобетонну трубу, розташовану під магістраллю в місті Вілмінгтон, застосувавши метод гільзування без необхідності перекриття руху (рис. 2.4).

За оцінками американських дослідників економія застосування методу гільзування порівняно з демонтажем пошкодженої труби склала майже 1 млн доларів [131].



Рис. 2.4. Відрновлення залізобетонної водопропускної труби методом гільзування в м. Вілмінгтон, штат Делавер (США) [131]

Метод гільзування активно застосовується не лише за кордоном, а й в Україні. Прикладом успішного впровадження цієї технології є проекти, виконані компанією «ВІАКОН УКРАЇНА», яка спеціалізується на виробництві та монтажі гофрованих металевих конструкцій (рис. 2.5–2.6).



а



б

Рис. 2.5. Реконструкція переходу на автомобільній дорозі

Київ – Луганськ – Ізварине [129]: *а* – під час реконструкції; *б* – після реконструкції



а



б

Рис. 2.6. Ремонт мосту через річку Коритна на км 15+372 автомобільної дороги загального користування місцевого значення О-02-27-03 Качківка-Дзигівка-Михайлівка у Вінницькій області [132]: *а* – до ремонту; *б* – після ремонту

Відновлення водопропускних труб на автомобільних дорогах має здійснюватися відповідно до розробленого проєкту, а також з дотриманням вимог технічних регламентів та нормативних документів, зокрема П-Г.1-218-113 [133] та

ДБН В.2.3-22-2009 [105]. У роботі [134] автори зазначають, що нормативна база не надає існуючих підходів до ремонту дорожніх водопропускних труб, що ускладнює планування та реалізацію відновлювальних заходів.

Для впорядкування процесу ремонту транспортних споруд, зокрема водопропускних труб, доцільно застосовувати алгоритм (рис. 2.7), запропонований у роботі [69]. Він передбачає чотири послідовні етапи проведення ремонтних робіт, що дозволяють систематизувати процес від обстеження конструкції до її відновлення.

На *першому етапі*, на основі виконаних натурних обстежень, визначають наявність дефектів і пошкоджень, аналізують причини та ступінь руйнування конструкцій, а також приймають рішення щодо необхідності та терміновості їх усунення. У разі ухвалення рішення про проведення ремонтних робіт вивчаються вимоги замовника, умови експлуатації та використання споруди. Без цієї інформації неможливо встановити критерії для визначення властивостей матеріалів.

На *другому етапі* здійснюється організаційно-технічна підготовка до ремонту споруди, що включає попередній збір даних та аналіз історії її експлуатації. У ході цих заходів визначається технічний стан окремих конструкцій та елементів, їхня експлуатаційна придатність або можливість її відновлення. Також виявляються причини зниження функціональності конструкцій та досліджуються умови їх експлуатації.

На *третьому етапі*, на основі результатів проведених обстежень, класифікації виявлених дефектів і пошкоджень, а також вимог замовника, формується технічне завдання на розробку проєкту ремонтних робіт. Це завдання включає вибір ефективної технології та матеріалів з урахуванням аналізу їх властивостей. Визначаються експлуатаційні вимоги до матеріалів та встановлюються їхні пріоритети.

На *четвертому етапі* виконуються безпосередньо ремонтні роботи, спрямовані на відновлення експлуатаційної придатності конструкції або її окремих елементів. У результаті цих робіт забезпечується надійна та довговічна функціональність як самої конструкції, так і ремонтної системи.

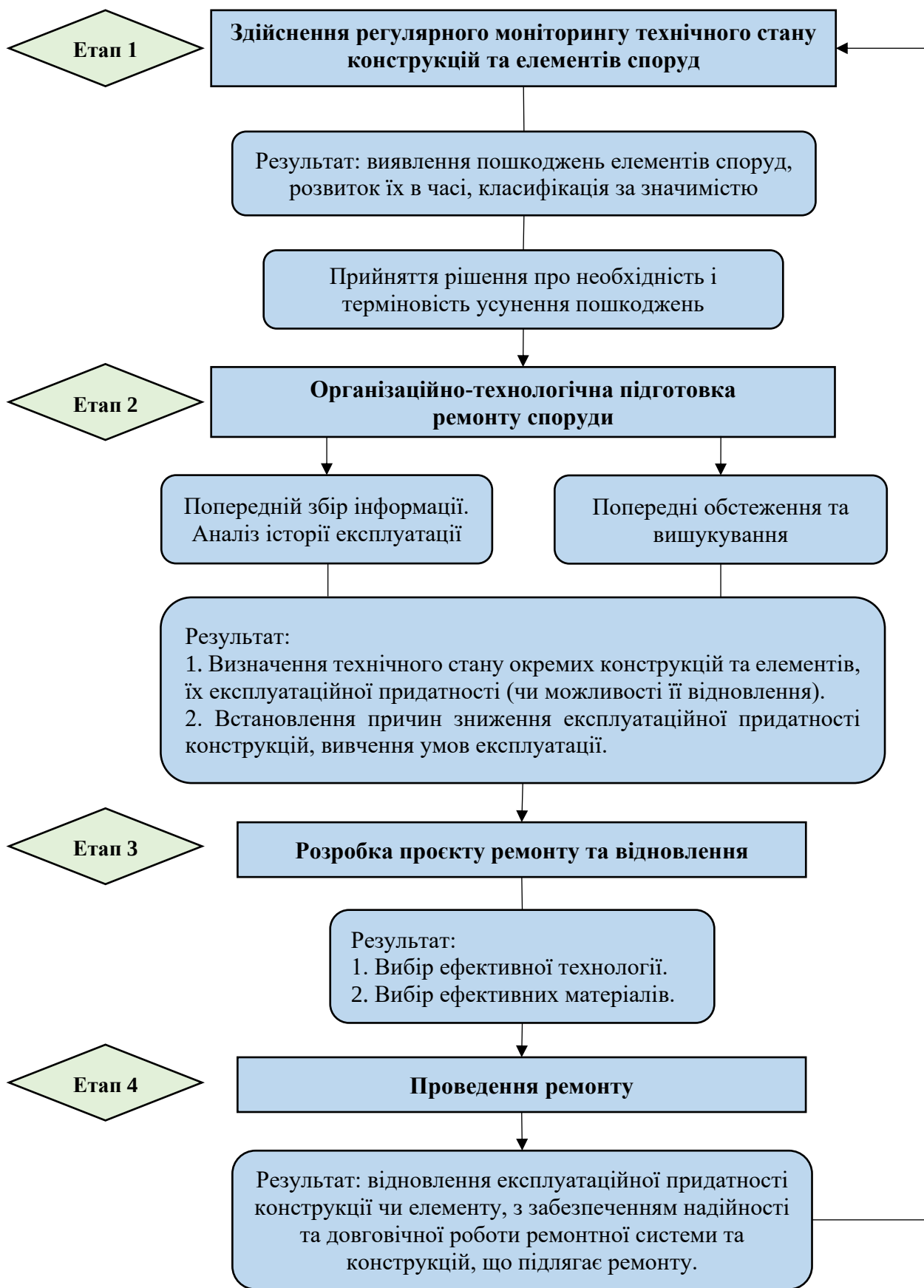


Рис. 2.7. Система підтримання експлуатаційної придатності споруд [69]

При цьому типова технологічна карта на ремонт водопропускних труб [135] не наводить особливості проведення ремонту методом гільзування.

Ремонт гільзуванням передбачає виконання чіткої послідовності операцій. У роботі [68] авторами запропонована методика виконання ремонту труб даним методом (рис. 2.8), яка охоплює два ключових етапи: проєктування та будівництво. На етапі проєктування необхідно провести комплекс інженерно-вишукувальних робіт, визначити оптимальний діаметр конструкції та виконати розрахунок довговічності майбутньої споруди, враховуючи умови експлуатації та навантаження.

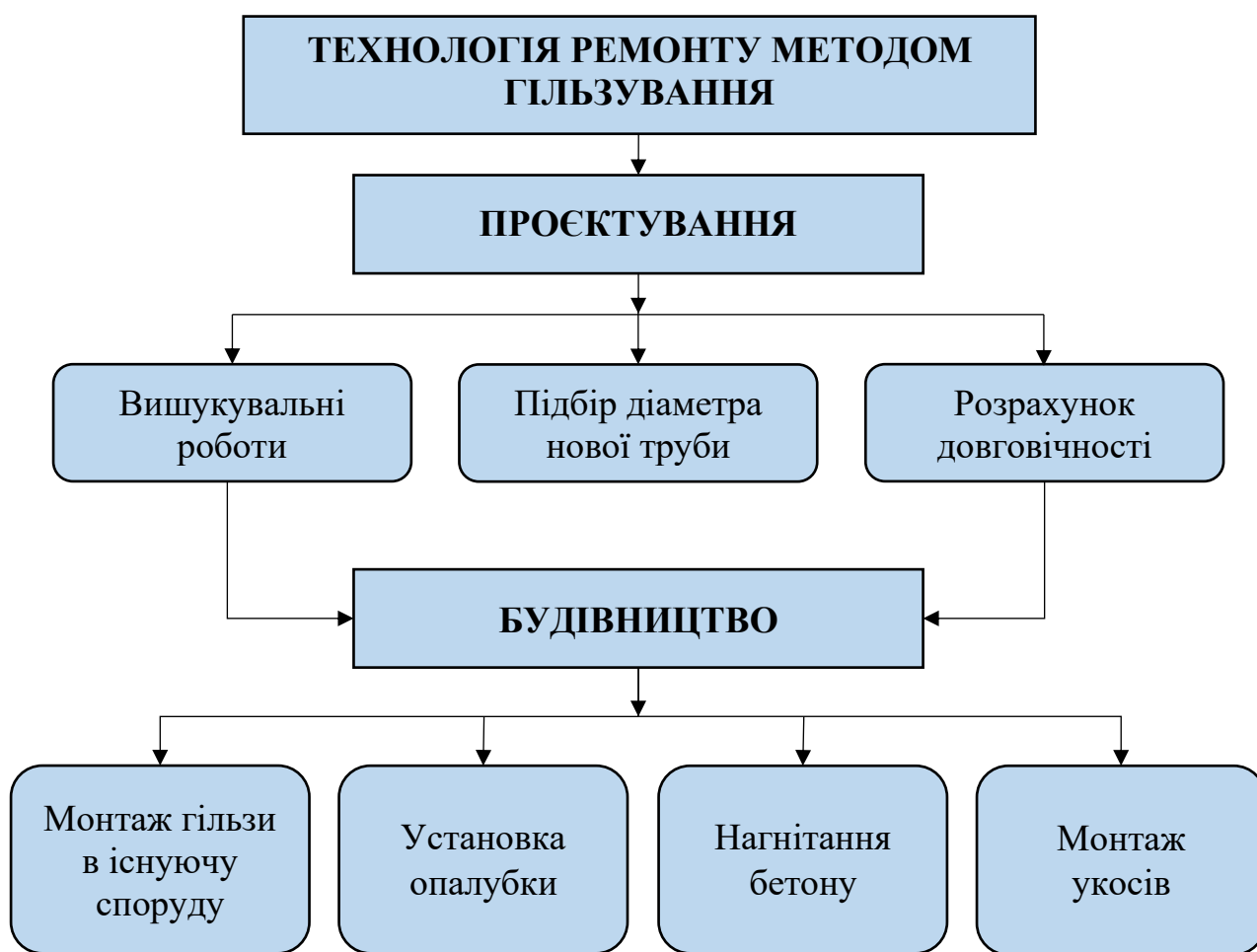


Рис. 2.8. Послідовність етапів ремонту дефектних залізобетонних водопропускних труб методом гільзування [68]

Вишукувальні роботи передбачають проведення обстеження залізобетонних труб, що потребують ремонту, для визначення технічного стану та перевірки відповідності встановленим експлуатаційним вимогам. Проведення обстеження

регламентується вимогами ДБН В.2.3-6-2009 [42] та ДСТУ 9123:2021 [136]. Відповідно до результатів вишукувальних робіт необхідно обрати форму нової труби, що буде використовуватись для відновлення дефектної споруди. Під час вибору форми нової труби необхідно враховувати два ключові критерії: конфігурацію конструкції, яка підлягає ремонту, та необхідний розмір отвору після виконання ремонтних робіт. Оскільки після відновлення пропускний отвір труби зменшиться, на етапі проєктування слід застосовувати матеріали з мінімальним коефіцієнтом шорсткості. Це дозволить зменшити гідравлічний опір та забезпечити необхідні характеристики пропускної здатності. Водночас у певних ситуаціях зменшення розміру отвору не обов'язково призводить до погіршення гідравлічних властивостей відновленої конструкції, що залежить від правильного підбору матеріалів та геометричних параметрів.

На етапі будівництва здійснюється монтаж гільзи (нової труби) в існуючу споруду. Потім встановлюється опалубка, після чого нагнітається бетонна суміш. Після того, як бетон набирає проєктної міцності, опалубка демонтується, і здійснюється монтаж укосів насипу.

Під час монтажу необхідно встановити обмежувачі, які запобігають переміщенню конструкції під час ущільнення бетону (особливо перед його заповненням).

Нова труба найчастіше встановлюється двома способами [65, 68, 137]. Перший спосіб передбачає монтаж труби, довжина якої відповідає довжині об'єкта або є більшою в разі необхідності подовження існуючої водопропускної труби. Другий спосіб полягає в послідовному з'єднанні ланок труби під час монтажу всередині дефектної залізобетонної труби.

Процес встановлення нової труби в існуючу конструкцію описаний в роботі [134] та виконується у кілька етапів:

1. Підготовка напрямних. Для забезпечення правильного монтажу ремонтної труби у пошкодженій конструкції встановлюються напрямні. Вони мають мінімальну висоту 50 мм і фіксуються відповідно до проєктних осьових та висотних відміток. Для регулювання ухилу використовують нівелір і клини. Напрямні можуть

виготовлятися з дерева, полімерних труб або металопрокату. Закріплення виконується безпосередньо на внутрішній поверхні пошкодженої труби або гільзи (рис. 2.9). При цьому необхідно забезпечити вільне проходження бетонної суміші через напрямні. У разі рівної лоткової частини (відсутності виступів, що заважають просуванню труби) напрямні можуть не встановлюватися.

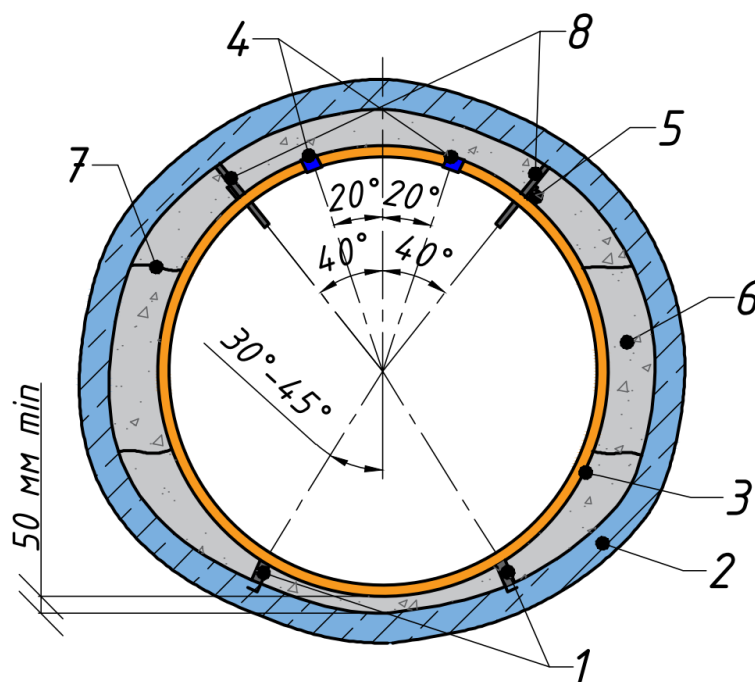


Рис. 2.9. Розташування гільзи всередині ремонтної труби: 1 – напрямні, закріплені на гільзі чи аварійній трубі; 2 – труба, що підлягає ремонту; 3 – нова труба (гільза); 4 – фітинги для заливки бетонної суміші; 5 – приварений кутник з гайкою; 6 – міжтрубний простір; 7 – рівень заливки суміші; 8 – утримуючі (вирівнюючі) болти

2. Протягування допоміжного тросу. У порожнині пошкодженої труби спочатку протягується трос, призначений для подальшого протягування нової труби. Його розривне навантаження має перевищувати загальну масу нових секцій, що забезпечує безпеку та ефективність монтажу.

3. Протягування каната для бетонування. У простір існуючої труби додатково протягується канат, виготовлений з натуральних або штучних волокон. Його розривне навантаження повинно бути не менше 500 кг. Канат використовується для

подальшого протягування гнучкого шланга, через який здійснюватиметься подача бетонної суміші.

4. Підготовка першої секції нової труби. Перша секція гільзи доставляється до місця встановлення за допомогою автокрана та розміщується біля входу в пошкоджену трубу.

5. Фіксація троса на новій трубі. На торці першої секції труби закріплюється допоміжний трос, який використовуватиметься для її протягування. Фіксація здійснюється за допомогою струбцин або заздалегідь передбачених монтажних вушок.

6. Підготовка буксирувального механізму. Протилежний кінець троса підключається до лебідки або іншого механізму, здатного забезпечити поступове та контрольоване просування труби всередині існуючої конструкції.

7. Протягування першої секції. Перша секція труби просувається всередину існуючої конструкції, залишаючи ззовні її торець довжиною не менше 500 мм. Це необхідно для подальшого встановлення з'єднувального бандажа.

8. Монтаж наступних секцій. Друга секція ремонтної труби подається автокраном до входу в пошкоджену трубу. Подальший монтаж виконується аналогічно першій секції.

9. З'єднання секцій. Для забезпечення герметичності та надійності конструкції окремі секції ремонтної труби з'єднуються між собою за допомогою спеціальних бандажів.

Оскільки поперечні перерізи дефектних труб, які підлягають ремонту, мають різну форму та розмір, для заповнення простору між ремонтною трубою та новою трубою використовують різні матеріали та методи. Зазвичай для заповнення застосовують розчин сухої будівельної суміші (СБС) або дрібнозернисту самоущільнювальну бетонну суміш (Self-Compacting Concrete – SCC) [138, 139]. Їхньою відмінною характеристикою є здатність ущільнюватися без застосування механічного впливу, рівномірно заповнювати форму під дією власної ваги без необхідності вібрації, а також самостійно виводити повітря. Це дозволяє мінімізувати трудомісткі та енерговитратні процеси укладання й ущільнення, покращити

санітарно-гігієнічні умови праці та забезпечити отримання високоякісної поверхні конструкції після розпалублення [140].

Важливо, щоб матеріал, яким заповнюється простір, забезпечував ефективну спільну роботу відремонтованої конструкції та нової труби. Для цього потрібно правильно і щільно заповнити простір, уникнувши утворення повітряних порожнин. Простір між існуючим об'єктом і трубою заповнюється бетонною сумішшю рідкої консистенції під тиском 0,6 МПа, щоб вона могла повністю заповнити весь простір між конструкціями, забезпечуючи надійність та міцність з'єднання. У праці [147] рекомендується використовувати бетон класу C12/15 та заповнювачі згідно ДСТУ 9208:2022 [141], з максимальним діаметром зерен до 16 мм, а також марку за морозостійкістю, яка відповідає вимогам до конструкцій для конкретного регіону згідно ДСТУ Б В. 2.7-47 [142]. Бетонні суміші повинні бути ущільнені за допомогою глибинних вібраторів, проте важливо обережно їх застосовувати, щоб уникнути пошкодження нової труби. Також допускається використання саморозширюваних та самоущільнювальних бетонних сумішей, що можуть полегшити процес ущільнення та покращити якість з'єднання.

Рекомендується залишити не менше 50 мм вільного простору між зовнішнім контуром нової труби та існуючим об'єктом. Заповнення цього простору бетонною сумішшю має здійснюватися симетрично з обох боків труби, попередньо забезпечивши захист від виштовхування чи переміщення через силу плавучості рідкого бетону. Для цього можуть бути використані різні методи, такі як баластування труби мішками з піском, установка розпорів або поетапне бетонування [137].

Щоб бетонна суміш могла вільно заповнити простір між існуючою трубою і новою трубою, слід передбачити повітревідвідні канали, розташовані в місцях, що відповідають довжині та габаритам об'єкта. Видалення повітря має здійснюватися через отвори, розташовані в верхній частині простору, що підлягає заповненню, для ефективного заповнення та контролю ступеня заповнення (рис. 2.10 та рис. 2.11).

Бетонну суміш можна подавати різними способами: від торця стінки опалубки, яка обмежує витікання суміші (рис. 2.10, *а*); через отвори, просвердлені в дорожньому полотні, що проходять через конструкцію старого об'єкта (рис. 2.10, *б*);

через отвори в тілі насипу, що проходять через конструкцію існуючого об'єкта (рис. 2.11); через технологічні отвори в новій трубі.

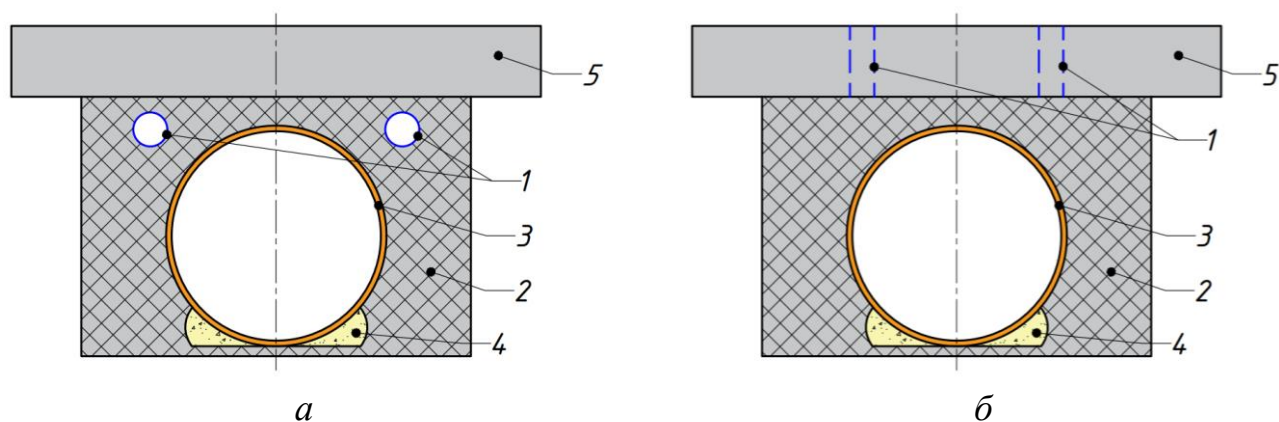


Рис. 2.10. Отвори для подачі бетону: *а* – розміщені в торці опалубки; *б* – розміщені в площадці старого об'єкту: 1 – отвори для подачі (оглядові); 2 – опалубка; 3 – нова труба; 4 – подушка з піску, або гранвідсіву; 5 – плита площадки об'єкта, який ремонтується

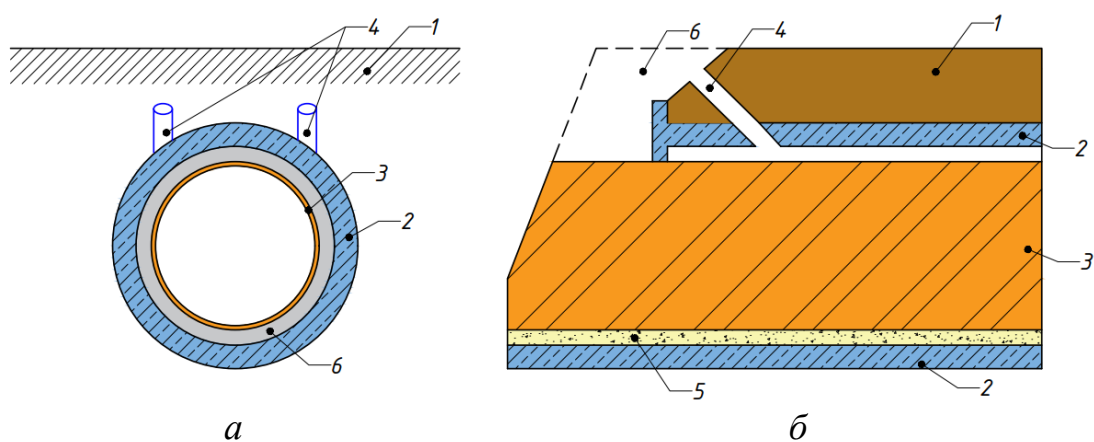


Рис. 2.11. Отвори для подачі бетону, розміщені у насипі: *а* – вид з торця подачі бетону; *б* – поздовжній переріз, об'єкту; 1 – насип; 2 – об'єкт, який ремонтується; 3 – нова труба; 4 – отвори для подачі бетону, або оглядові; 5 – подушка з піску, або гравію із розширення насипу; 6 – опалубка, геотекстиль, або геосітка

Перед початком подачі бетонної суміші необхідно встановити опалубку, розташовану на стиках між кінцями об'єкта, що ремонтується, і новою конструкцією (рис. 2.10). Як альтернативу дерев'яній опалубці можна використати цегляну або кам'яну стінку, яка демонтується після тужавіння розчину.

У випадках подачі суміші з торця можливе застосування технології ступінчастої зміни рівня подачі, але така методика ефективна лише для об'єктів із діаметром отвору труби понад 3,5 м та відстанню до стінки старої конструкції понад 1,0 м. Отвори для подачі бетонної суміші повинні мати діаметр не менше 25 см, що забезпечує безперешкодне проходження шланга.

Заповнення простору між конструкціями може виконуватись гравійно-піщаною сумішшю або піском із фракцією менше 4,5 мм із неоднорідною зернистістю. Гравійна суміш має бути ретельно ущільнена з коефіцієнтом ущільнення від 0,98 до 1,0, причому ущільнення виконується шарами товщиною 0,2–0,3 м.

У деяких випадках посилення конструкцій передбачає їх подовження. У таких ситуаціях може знадобитися влаштування додаткового насипу на подовжених ділянках. Це рішення є практичним, адже дозволяє подальше подовження об'єкта шляхом зняття насипу над вхідною та вихідною частинами споруди. Подовження реалізується шляхом приєднання нових ланок до існуючої конструкції з наступним повторним засипанням насипу.

Розглянувши технологію методу гільзування, необхідно визначити геометричні параметри труб, які будуть використовуватися у подальших теоретичних розрахунках та експериментальних випробуваннях.

2.2. Конструктивні параметри дослідних зразків труб

Для подальших теоретичних розрахунків напружено-деформованого стану труби, а також для виготовлення лабораторних зразків, які будуть використані в експериментальних випробуваннях, що наведено у розділі 4, визначено основні геометричні параметри досліджуваних труб. Вибір цих параметрів здійснено з урахуванням технічних характеристик випробувального устаткування, його конструктивних особливостей, а також можливостей науково-дослідної лабораторії НДЛ-23 кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка».

Вимоги до класу бетону та армування залізобетонних труб наведені в ДСТУ Б В. 2.5-63:2012 [41]. Для виготовлення труб стандарт передбачає важкий бетон згідно ДСТУ 9208:2022 [141] класу міцності на стиск C25/30 з середньою густиною (2200-2500) кг/м^3 , маркою за морозостійкістю F 100 та маркою за водонепроникністю не нижче W 6.

Для армування труб ДСТУ Б В. 2.5-63:2012 [41] передбачає використання гарячекатаної арматурної сталі класів A240C та A400C згідно ДСТУ 3760 [143] та дрiт Вр I.

Для подальших теоретичних розрахунків і експериментальних випробувань, а також для реалізації підсилення різними методами, визначено основні геометричні параметри залізобетонної труби та обрано відповідні матеріали.

Геометричні параметри залізобетонної труби є спільними для всіх методів підсилення та становлять: зовнішній діаметр – 725 мм; внутрішній діаметр – 585 мм; товщина стінки – 70 мм; ширина – 400 мм; вага – 130 кг; клас бетону – C25/30; армування – дрiт Вр1. Конструктивну схему залізобетонної труби наведено на рис. 2.12.

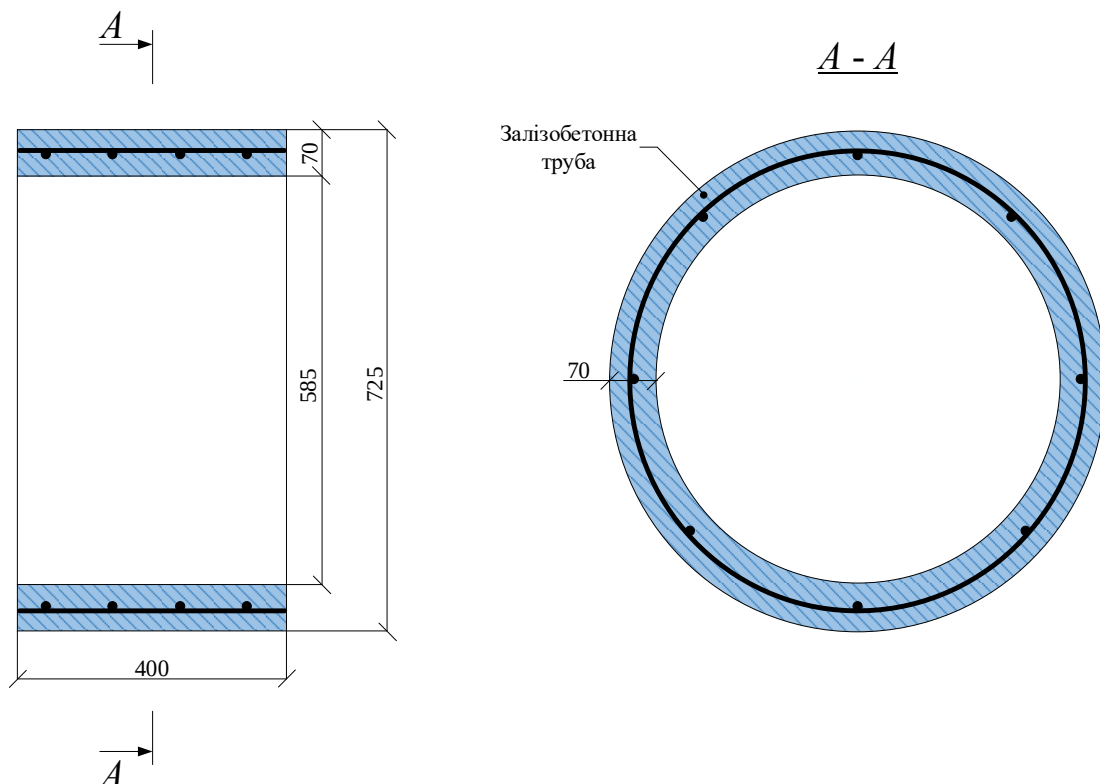


Рис. 2.12. Схема залізобетонної труби без підсилення

На основі визначених геометричних параметрів залізобетонної труби будуть розглянуті та досліджені пропоновані методи підсилення (гільзування, гільзування із використанням арматурного каркасу та ін'єктування), що дозволить здійснити їхнє комплексне оцінювання як у теоретичних розрахунках, так і в межах експериментальних досліджень.

У патенті на корисну модель [144] з метою підвищення якості та надійності підсилення залізобетонних труб методом гільзування запропоновано використання самоущільнювального розчину для заповнення простору між існуючою та новою трубою. Такий розчин не потребує додаткового ущільнення за допомогою вібрації, що дозволяє уникнути небажаного динамічного впливу на ослаблену конструкцію труби. Завдяки високій рухливості та здатності самочинно заповнювати форму, самоущільнювальні розчини забезпечують рівномірне обтиснення поверхні труби, покращують зчеплення між новим та старим бетоном і сприяють підвищенню загальної жорсткості конструкції. Крім того, використання таких розчинів спрощує технологічний процес, знижує трудомісткість виконання робіт і покращує санітарно-гігієнічні умови при їхньому влаштуванні.

Згідно з рекомендаціями [146] клас міцності бетону, що використовується для підсилення споруд методом гільзування, на стиск має бути не нижче C25/30, марки за морозостійкістю не нижче F 200 та водонепроникності не нижче W 4. Під час вибору класу міцності нового бетону рекомендовано приймати його не нижчим за клас міцності конструкції, що потребує підсилення.

Для підсилення пошкодженої залізобетонної труби методом гільзування обрано такі матеріали:

Нова металева труба: тип – зварна металева труба; матеріал – сталь Ст3; діаметр – 500 мм; товщина – 2 мм, довжина 450 мм.

Матеріал для заповнення конструктивного зазору: ремонтна суміш з міцністю 35 МПа.

Конструктивну схему залізобетонної труби, підсиленої методом гільзування наведено на рис. 2.13.

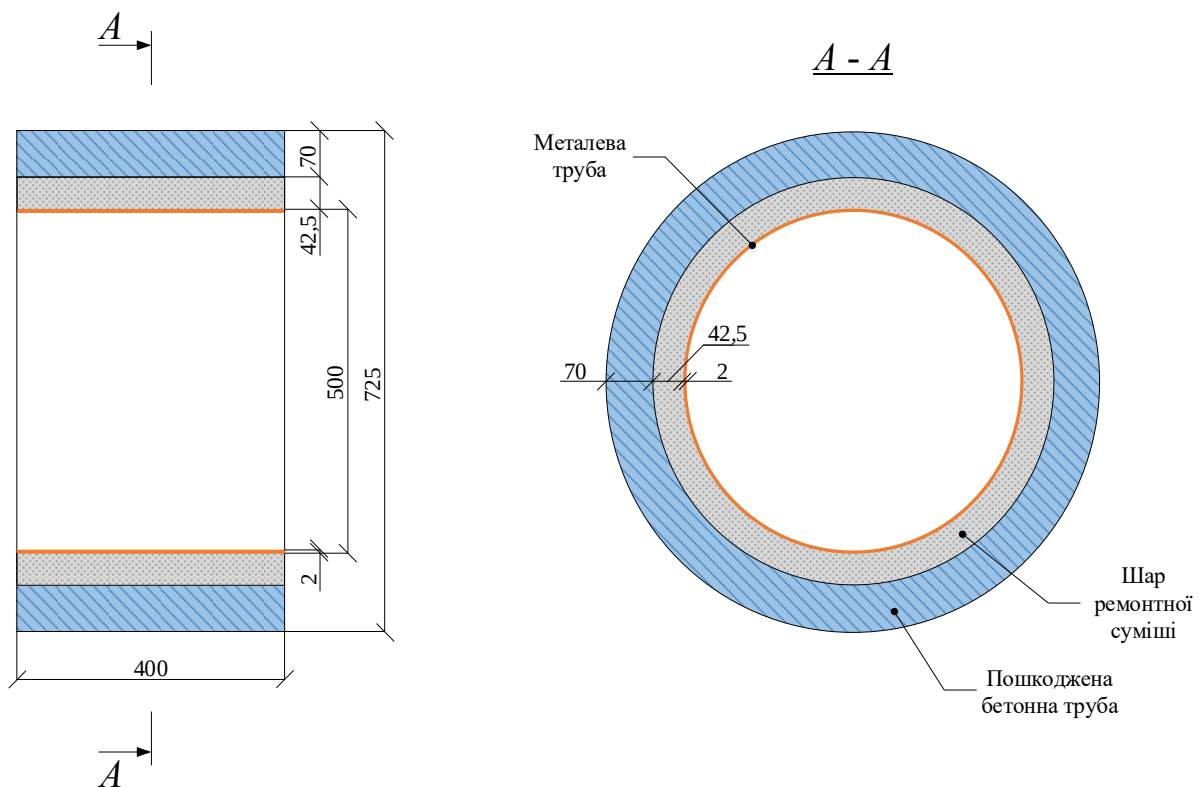


Рис. 2.13. Конструктивна схема підсиленої залізобетонної труби методом гільзування

2.3. Вдосконалення методу гільзування додаванням арматурного каркасу

Гоголь М. В. у своїй праці [147] підкреслює, що сучасний розвиток будівельної галузі обумовлює необхідність розробки інноваційних, більш ефективних інженерних конструкцій та технологій їх підсилення, які б забезпечували високі експлуатаційні характеристики, водночас сприяючи зменшенню матеріаломісткості та трудомісткості їхнього виготовлення.

У роботі [68] авторами проведені дослідження, що спрямовані на розробку перспективних технологій ремонту пошкоджених залізобетонних водопропускних труб гільзуванням із використанням металевих гофрованих конструкцій. Автори зазначають, що проблема стає дедалі актуальнішою через поступове погіршення стану залізобетонних труб, зокрема й тих, які були зведені за типовими проєктами. Зниження їх надійності вимагає пошуку нових підходів до відновлення функціональності таких споруд, забезпечуючи їхню довговічність і відповідність

сучасним експлуатаційним вимогам. Тому вдосконалення існуючих методів відновлення труб є вкрай актуальним та важливим завданням.

Метод гільзування давно зарекомендував себе як одна з найефективніших технологій підсилення залізобетонних водопропускних труб, що забезпечує суттєве підвищення їхньої несучої здатності, стійкості до експлуатаційних навантажень та тривалості служби. Проте традиційна методика має певні конструктивні й технологічні обмеження, які можуть негативно впливати на довговічність підсиленої конструкції, особливо за умов тривалого впливу змінних навантажень.

Основні проблеми класичного методу гільзування полягають у нерівномірності розподілу напружень у системі «стара труба – ремонтна суміш – нова труба», що може призводити до локальних зон перенапруження. Ще однією значною проблемою є недостатня тріщиностійкість конструкції під дією змінних навантажень, що може призводити до поступового розвитку дефектів і зниження експлуатаційної надійності.

Враховуючи ці аспекти, одним із перспективних шляхів удосконалення методу гільзування є додаткове армування шляхом використання арматурного каркасу, який дозволить більш рівномірно розподілити навантаження, забезпечить покращену жорсткість і міцність та покращить роботу конструкції в цілому [145].

Для усунення зазначених недоліків запропоновано вдосконалений метод гільзування, що передбачає встановлення просторового арматурного каркасу в кільцевому зазорі між старою та новою трубою. Ця технологія, описана в патенті на корисну модель [148], потенційно дозволить значно покращити розподіл напружень та підвищити жорсткість конструкції.

Основні елементи каркасу (рис. 2.14):

- Поздовжня арматура. Забезпечує підвищення міцності конструкції у напрямку основних навантажень.
- Поперечна арматура або сітка. Сприяє рівномірному розподілу напружень та підвищує стійкість до тріщиноутворення.
- Фіксатори арматурного каркасу. Гарантують збереження необхідного захисного шару бетону та запобігають зміщенню каркасу під час бетонування.

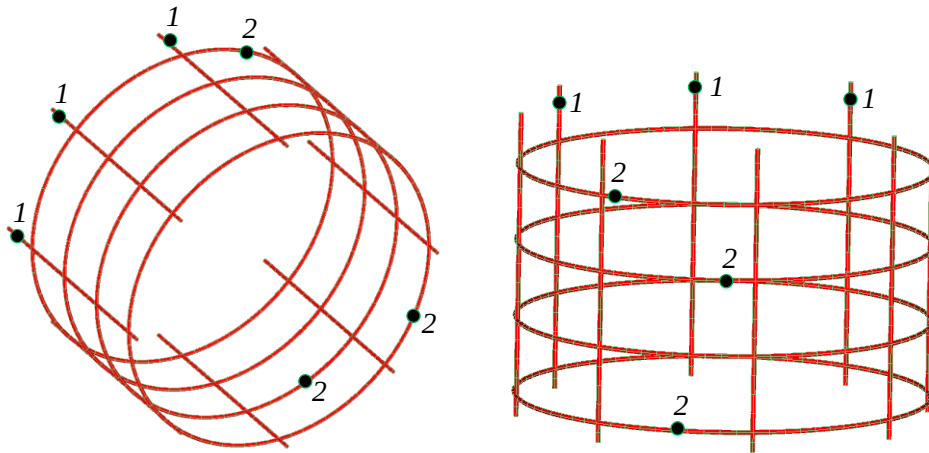


Рис. 2.14. Просторовий арматурний каркас: 1 – поздовжня арматура; 2 – поперечна арматура

Конфігурація арматурного каркасу визначається залежно від діаметра труби, величини очікуваних навантажень та умов експлуатації. Оптимальним варіантом є використання просторового каркасу, що складається із кільцевих і поздовжніх арматурних елементів, закріплених між собою зварюванням або в'язальним дротом.

Технологічна послідовність робіт із використанням арматурного каркасу має такі етапи:

1. Встановлення нової труби всередину старої відповідно до проектного положення, забезпечуючи рівномірний зазор для бетонного заповнення.

2. Монтаж арматурного каркасу у кільцевий простір між трубами. Каркас попередньо виготовляється зварюванням або в'язальним дротом та встановлюється у міжтрубний простір.

3. Фіксація каркасу за допомогою спеціальних фіксаторів або дерев'яних клинів, що запобігають його зміщенню при заповненні простору між трубами. За необхідності арматурний каркас можна закріплювати до поверхні існуючої труби.

4. Заповнення простору між трубами ремонтною сумішшю, яка забезпечує рівномірне заповнення всіх порожнин без додаткового ущільнення.

5. Контроль якості заповнення та подальше витримування суміші до досягнення необхідної міцності.

Очікуваний ефект від застосування арматурного каркасу у процесі гільзування:

- збільшення несучої здатності труби, оскільки арматура бере участь у розподілі навантажень;
- підвищення тріщиностійкості за рахунок обмеження розкриття тріщин та їхнього подальшого розвитку;
- зниження ризику нерівномірного осідання бетонного заповнення та утворення внутрішніх порожнин;
- забезпечення довговічності підсиленої конструкції завдяки підвищенню міцності та рівномірному розподілу напружень.

Для проведення подальших теоретичних і експериментальних досліджень методу гільзування з арматурним каркасом, крім базових параметрів залізобетонної труби, визначено додаткові матеріали:

Параметри нової металевої труби: тип – зварна металева труба; матеріал – сталь Ст3; діаметр – 500 мм; товщина – 2 мм, довжина 450 мм.

Матеріал для заповнення конструктивного зазору: ремонтна суміш з міцністю 35 МПа. Клас арматури просторового каркасу – Ø6A240С.

Конструктивну схему залізобетонної труби, підсиленої методом гільзування із використанням просторового арматурного каркасу наведено на рис. 2.15.

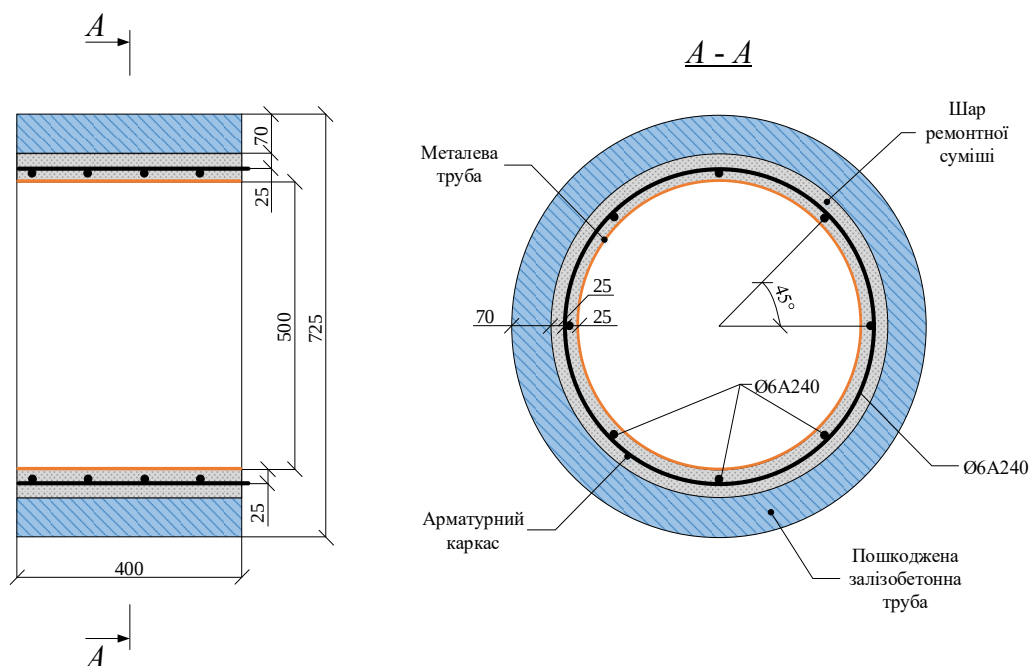


Рис. 2.15. Конструктивна схема підсиленої залізобетонної труби з додаванням просторового арматурного каркасу

Таким чином, використання арматурного каркасу у процесі гільзування дозволяє суттєво підвищити ефективність підсилення залізобетонних труб завдяки рівномірному розподілу навантажень, зниженню ризику тріщиноутворення, покращенню загальної жорсткості конструкції та забезпеченню її довговічності. Запропонований спосіб є перспективним для підсилення труб різних діаметрів, зокрема тих, що зазнали значних пошкоджень або функціонують за умов інтенсивної експлуатації.

2.4. Використання методу ін'єктування для відновлення труб

Хоча метод гільзування залізобетонних труб вважається одним із найефективніших методів їхнього підсилення [19], його застосування не завжди є оптимальним. Одним із основних недоліків цієї технології є зменшення внутрішнього діаметра труби внаслідок встановлення нової металевої гільзи та заповнення конструктивного зазору між старою трубою та новою оболонкою.

Таке звуження перерізу може незначно впливати на пропускну здатність труб у випадках, коли є запас гідравлічної пропускну здатності. Однак у ситуаціях, де навіть незначне зменшення діаметра може призвести до критичного зниження об'єму потоку води, використання гільзування стає недоцільним. Саме у таких випадках постає необхідність пошуку альтернативних методів відновлення, що дозволять зберегти геометричні параметри труби без зменшення її перерізу.

Одним із таких ефективних рішень є метод ін'єктування, який передбачає введення спеціальних розчинів або полімерних складів у тріщини, пустоти та зони дефектів конструкції під тиском. Завдяки цьому відновлюється монолітність бетону, зміцнюється його структура та запобігається подальший розвиток пошкоджень.

Метод ін'єктування набув широкого поширення ще в 80-х роках минулого століття, коли його почали активно використовувати для закриття тріщин у конструкціях, що зробило його одним із найважливіших і найпоширеніших методів ремонту [149].

Відповідно до ДСТУ Б В.3.1-2:2016 [151], відновлення пошкоджених бетонних конструкцій може здійснюватися шляхом ін'єктування або просочення із застосуванням спеціальних ремонтних розчинів. Ця технологія передбачає точне дотримання вимог щодо матеріалів та процесу їхнього введення, що забезпечує високу ефективність відновлювальних робіт.

У країнах Європи ін'єкційний метод відновлення конструкцій регламентується стандартом EN 1504 [152]. Цей стандарт охоплює всі ключові етапи ремонту, зокрема: проведення діагностики для визначення причин пошкоджень, вибір оптимального методу відновлення, встановлення вимог до технічних характеристик матеріалів, визначення методів випробувань, а також здійснення контролю та оцінювання якості виконаних робіт.

Окрім цього, EN 1504 [152] регламентує вимоги до технології ін'єктування та просочення залізобетонних конструкцій, а також визначає характеристики матеріалів, які можуть бути використані для проведення таких робіт.

Попри ефективність, ін'єктування є досить складною технологією, оскільки передбачає врахування значної кількості фізико-механічних характеристик матеріалів та технічних аспектів, пов'язаних з їхньою поведінкою в процесі експлуатації. Крім того, з огляду на вимоги до довговічності конструкції та можливість виникнення потреби у подальшому ремонті, проведення таких робіт потребує особливої точності та відповідального підходу [153].

Згідно з дослідженнями [153], застосування епоксидних ін'єкційних смол дозволяє відновити до 90 % початкової міцності конструкції, що робить цей метод конкурентоспроможним порівняно з традиційними методами.

Технологія ін'єктування ґрунтується на введенні спеціальних розчинів або полімерних складів у тріщини, пустоти та дефектні зони конструкції під певним тиском, що дозволяє зміцнити структуру бетону, відновити його монолітність і запобігти подальшому розвитку пошкоджень.

Для відновлення залізобетонних водопропускних труб застосування ін'єктування доцільне в тих випадках, коли неможливо або економічно необґрунтовано здійснювати повну заміну пошкоджених труб або підсилення іншими

методами, а також у ситуаціях, коли важливо зберегти експлуатаційні характеристики конструкції без значного втручання в її несучу здатність. Ін'єктування є особливо ефективним для локального ремонту тріщин, ліквідації пустот, запобігання фільтрації води через дефекти стінок труби, а також для зміцнення зони стиків залізобетонних ланок.

Порівняно з методом гільзування або заміною труби, ін'єктування вирізняється своєю здатністю виконувати роботи без демонтажу конструкції, що значно скорочує тривалість ремонтних заходів і знижує витрати на відновлення. Крім того, цей метод дозволяє цілеспрямовано впливати на найбільш критичні зони труби, забезпечуючи їх зміцнення без надмірного навантаження на всю конструкцію.

Таким чином, метод ін'єктування теоретично може бути не лише економічно вигідним, а й вискоєфективним методом відновлення експлуатаційної придатності залізобетонних труб, що потенційно дозволить продовжити їхній термін служби за умови дотримання технологічних вимог та правильного вибору ін'єкційних матеріалів.

Технологія виконання ін'єктування включає кілька етапів, кожен з яких є важливим для забезпечення надійності та довговічності відновленої конструкції [150]:

1. Підготовка поверхні, яка передбачає очищення зони навколо тріщин від пилу, бруду, старих покриттів та інших забруднень, що можуть заважати адгезії ін'єкційного матеріалу. При необхідності тріщини розширюють, видаляючи слабкі або пошкоджені фрагменти бетону.

2. Буріння ін'єкційних отворів уздовж тріщини. Отвори розташовують таким чином, щоб забезпечити рівномірне заповнення всієї порожнини пошкодження. Їх діаметр і глибина залежать від товщини конструкції та розміру тріщини.

3. Встановлення ін'єкційних пакерів – спеціальних пристроїв, що дозволяють вводити розчин під тиском. Пакери монтують у просвердлені отвори, забезпечуючи герметичність у місцях введення матеріалу.

4. Ін'єктування ремонтного розчину. Під тиском розчин подається в тріщину, поступово заповнюючи весь простір. Процес триває до моменту, коли з сусідніх

пакерів починає виходити ін'єкційний матеріал, що свідчить про повне заповнення тріщини.

5. Видалення пакерів та контроль якості. Після завершення ін'єктування пакери видаляють, а отвори ретельно заробляють ремонтним розчином. Контроль якості виконаних робіт включає візуальний огляд, а при необхідності – ультразвукове або інше неруйнівне тестування, яке дозволяє переконатися у відсутності порожнин та рівномірності заповнення.

Процес використання методу ін'єктування для відновлення залізобетонної труби зображено на рис. 2.16.

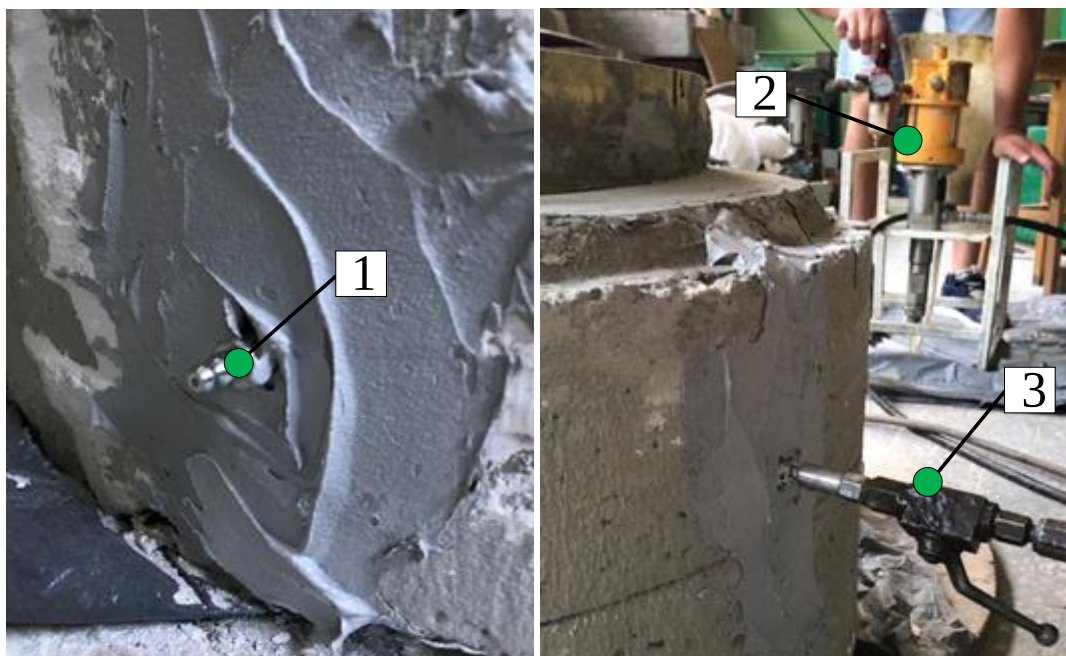


Рис. 2.16. Відновлення залізобетонної труби ін'єктуванням: 1 – ін'єкційний пакер; 2 – насос для подачі розчину; 3 – штуцер

Згідно ДСТУ Б В.3.1-2:2016 [151] розчини для ін'єктування пошкоджених залізобетонних труб, їх склад і технологія виконання робіт розробляється з урахуванням фізико-механічних властивостей споруди, її вологості тощо. Для відновлення сухих тріщин найбільш ефективними є епоксидні смоли, тоді як для вологих зон доцільно використовувати поліуретанові склади, здатні розширюватися під дією води, забезпечуючи надійну герметизацію.

Для ін'єкційних матеріалів визначаються ключові фізико-механічні характеристики, такі як міцність на стиск, адгезія до бетону, в'язкість, час тужавіння та стійкість до впливу зовнішніх чинників. Правильний вибір ін'єкційного матеріалу забезпечить ефективне відновлення труб, подовжить їх експлуатаційний ресурс та запобігатиме подальшому руйнуванню.

Для відновлення несучої здатності пошкодженої залізобетонної труби прийнято двокомпонентну епоксидну ін'єкційну смолою VIMEROX INJECT, яка здатна витримувати зусилля на стиск більш ніж 53 Н/мм^2 та має хорошу адгезію до бетону $> 8 \text{ Н/мм}^2$.

Конструктивну схему пошкодженої підсиленої гільзуванням залізобетонної труби, відновленої методом ін'єктування наведено на рис. 2.17.

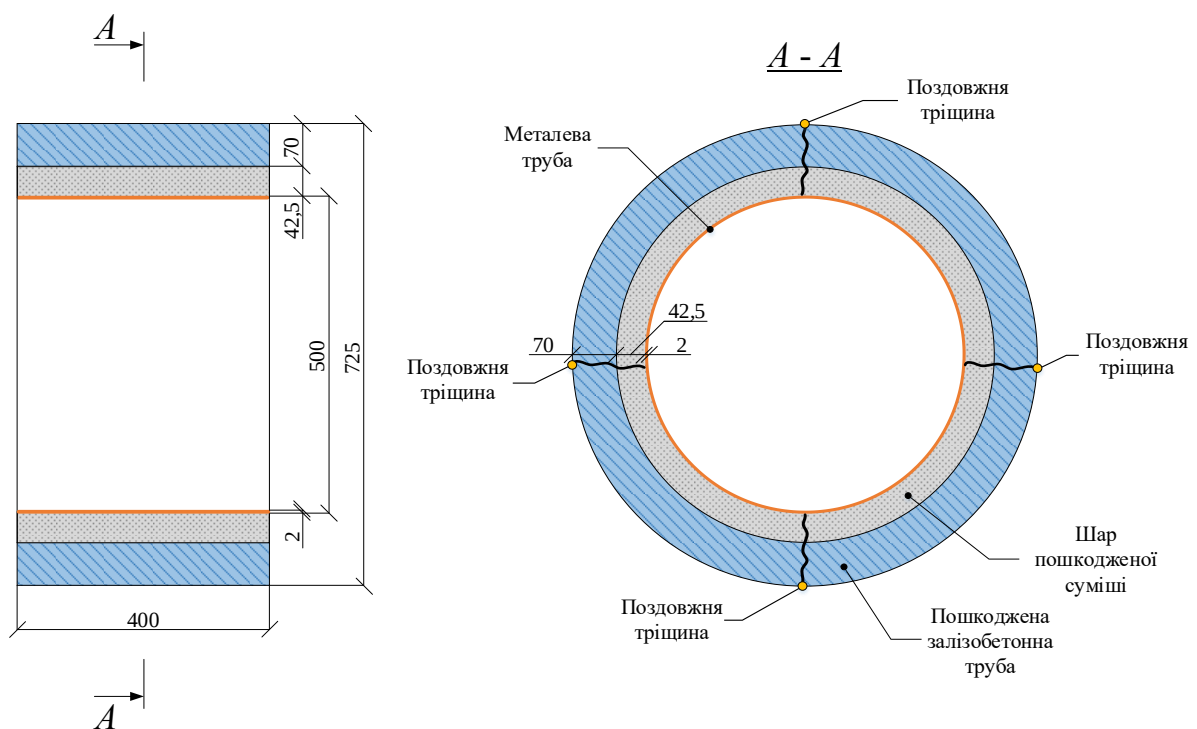


Рис. 2.17. Конструктивна схема пошкодженої підсиленої гільзуванням залізобетонної труби, відновленої методом ін'єктування полімерною сумішшю

Потенційні місця утворення тріщин для їх подальшого склеювання прийнято згідно схеми до розрахунку безнапірних залізобетонних труб на міцність в стадії граничної рівноваги (див. п. 1.3).

Аналіз методу ін'єктування як методом відновлення залізобетонних конструкцій дозволяє зробити висновок про його високу ефективність у ліквідації тріщин, порожнин та інших дефектів. Завдяки можливості цілеспрямованого заповнення пошкоджених зон спеціальними ін'єкційними розчинами забезпечується не лише герметичність, а й відновлення цілісності та міцності.

Особливо важливо, що ін'єктування дозволяє відремонтувати як сухі, так і вологі тріщини, що забезпечує тривалу експлуатацію труб навіть за умов підвищеної вологості та впливу агресивного середовища. Це робить метод оптимальним вибором для відновлення водопропускних труб, які постійно піддаються впливу води та змін температури.

Порівняно з гільзуванням або повною заміною труби, ін'єктування вирізняється тим, що цей метод дозволяє локально впливати на найбільш критичні зони труби, забезпечуючи їх зміцнення без надмірного навантаження на всю конструкцію.

Таким чином, метод ін'єктування не лише є економічно вигідним, а й високоефективним методом відновлення експлуатаційної придатності залізобетонних труб. За умови дотримання технологічних вимог і правильного вибору ін'єкційних матеріалів він дозволяє значно подовжити термін служби водопропускної труби та забезпечити її надійність під час подальшої експлуатації.

2.5. Інноваційні методи підсилення залізобетонних труб

На основі проведеного аналізу методів підсилення залізобетонних труб удосконалено технологію гільзування, що дозволило підвищити несучу здатність, довговічність і стійкість підсилених конструкцій до механічних впливів. Запропоновані технічні рішення зареєстровано у вигляді патентів України на корисні моделі № 152813 «Підвищення несучої здатності та довговічності дефектних залізобетонних труб» [154] та № 156692 «Підвищення несучої здатності бетонних труб» [148]. Основною перевагою цих методів є можливість підсилення залізобетонних труб без демонтажу існуючої конструкції, що є вагомим фактором при експлуатаційному утриманні та ремонті транспортної інфраструктури.

Запропоновані методи передбачають монтаж нової труби меншого діаметра всередину пошкодженої конструкції з подальшим заповненням проміжку між ними самоущільнювальним розчином (рис. 2.18). У першому варіанті підсилення формується монолітна багатошарова конструкція, яка ефективно розподіляє навантаження та збільшує несучу здатність.

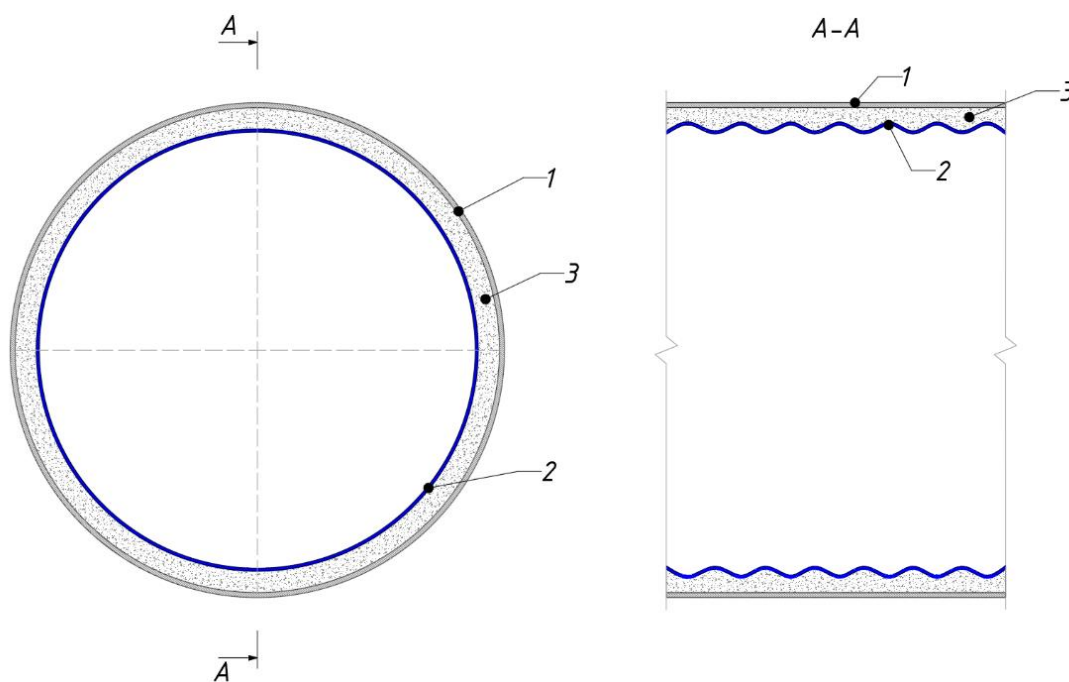


Рис. 2.18. Ілюстрація до патенту № 152813 [154]: 1 – залізобетонна труба;
2 – гофрована металева труба; 3 – самоущільнювальний розчин

Другий варіант підсилення передбачає додаткове армування простору між старою і новою трубою за допомогою арматурного каркасу (рис. 2.19). Це забезпечує рівномірний розподіл навантажень, підвищує тріщиностійкість та зменшує ризик руйнування при впливі змінних навантажень. Додатково використання арматурного каркасу покращує взаємодію шарів конструкції та сприяє ефективному перерозподілу напружень, що є важливим при дії динамічних і температурних впливів.

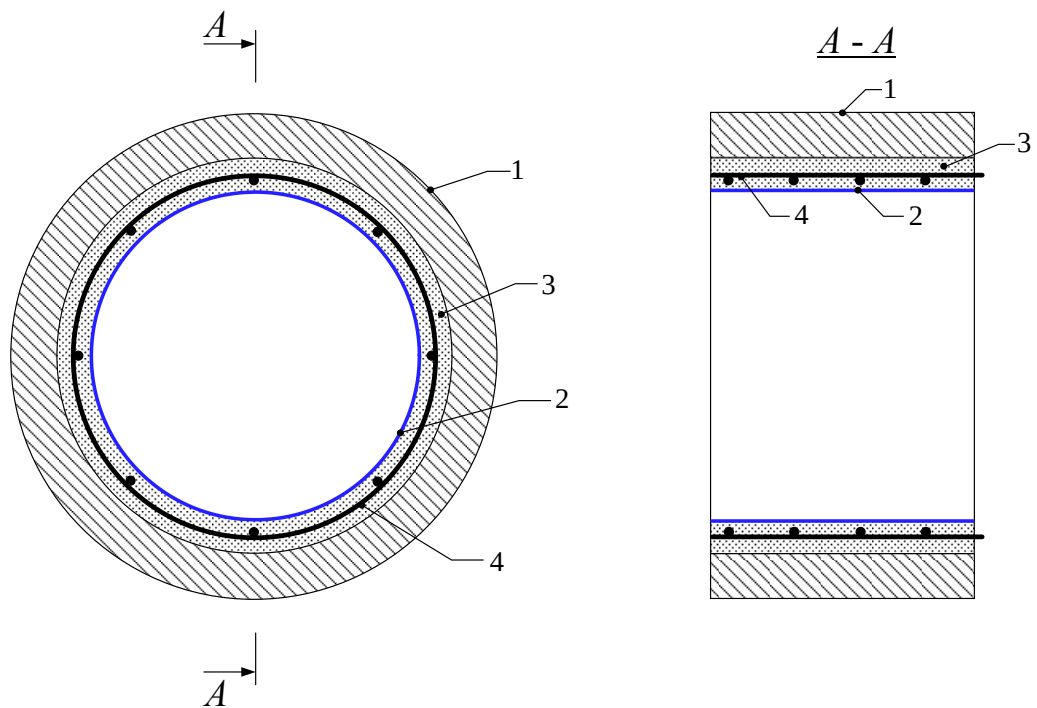


Рис. 2.19. Ілюстрація до патенту № 156692 [148]: 1 – бетонна труба; 2 – нова труба;
3 – самоущільнювальний розчин; 4 – арматурний каркас

Запропоновані методи підсилення можуть застосовуватися як для ремонту дефектних труб, так і для збільшення їх несучої здатності у випадках підвищених експлуатаційних навантажень. Вони дозволяють продовжити термін служби водопропускних споруд, підвищити їхню надійність та знизити витрати на капітальний ремонт. Зменшення концентрації напружень у зонах контакту матеріалів підвищує стійкість труб до розтріскування та сприяє зниженню рівня деградації конструкцій у процесі тривалої експлуатації.

Висновки до розділу 2

На основі проведеного аналізу конструктивних рішень, методів підсилення та матеріалів, що застосовуються для відновлення та підвищення несучої здатності залізобетонних труб, а також з урахуванням результатів розробки нових технічних рішень сформульовано такі висновки:

1. Удосконалено метод гільзування шляхом додавання просторового арматурного каркасу, що дозволяє суттєво підвищити міцність конструкції без

значного збільшення товщини підсилювального шару. Каркас рівномірно розподіляє навантаження та мінімізує ризик виникнення локальних деформацій.

2. Запропоновано використання ін'єкційного методу для відновлення несучої здатності залізобетонних труб. Цей метод розглянуто як ефективну альтернативу гільзуванню, що забезпечує якісне відновлення тріщин, пустот та інших дефектів. Його застосування дозволяє зберегти внутрішній переріз труби без зменшення її пропускної здатності, що є надзвичайно важливим у випадках, коли запас гідравлічної пропускної здатності відсутній.

3. Описано технологію виконання підсилення залізобетонних труб запропонованими методами, з детальним висвітленням етапів підготовки, монтажу арматурного каркасу, ін'єктування та контролю якості виконаних робіт.

4. Визначено оптимальні геометричні параметри залізобетонної труби та обґрунтовано вибір основних матеріалів, необхідних для проведення подальших теоретичних розрахунків і виконання експериментальних випробувань.

5. Розглянуто інноваційні методи підсилення залізобетонних труб, захищені патентами України, що базуються на удосконаленій технології гільзування. Використання цих технологій дозволить значно продовжити термін експлуатації залізобетонних труб, підвищити їхню несучу здатність та мінімізувати витрати на капітальний ремонт транспортної інфраструктури.

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ

3.1. Загальні положення теоретичного дослідження напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб

Підсилення залізобетонних труб методом гільзування призводить до формування багатошарової конструкції, що складається з матеріалів із різними фізико-механічними властивостями (рис. 3.1). Така неоднорідність значно ускладнює процес визначення напружень і деформацій, вимагаючи використання складних математичних моделей для коректного оцінювання НДС [155].

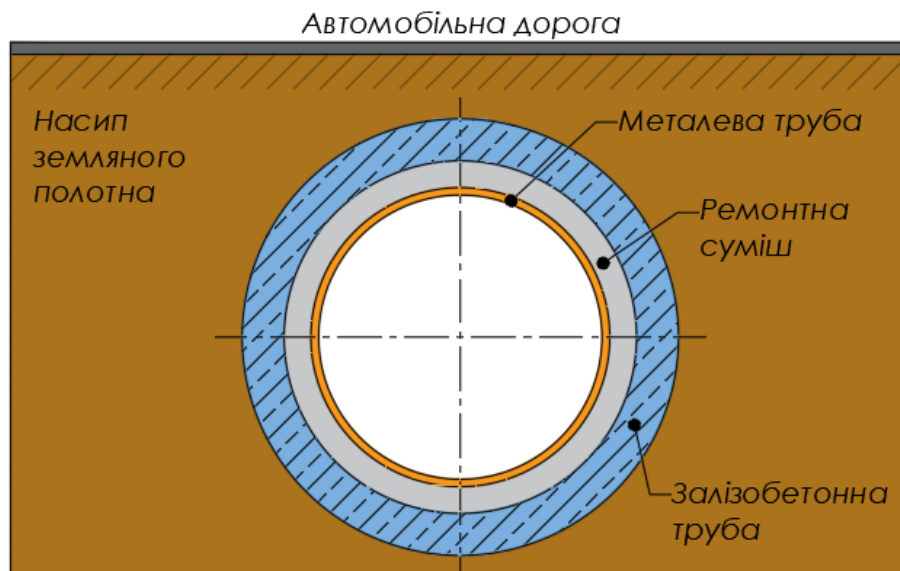


Рис. 3.1. Вигляд підсилення дефектної труби методом гільзування

У роботах [156, 157] досліджено фізико-механічні зміни характеристик матеріалів та їх вплив на несучу здатність залізобетонних балок. Аналогічно, у випадку підсилених залізобетонних труб температурні та силові впливи можуть викликати локальну концентрацію напружень у контакті матеріалів, що вимагає ретельного аналізу їхньої сумісної роботи та прогнозування змін напружено-деформованого стану [158].

З огляду на це, удосконалення теоретичного підходу та розробка ефективної методики оцінювання НДС тришарових систем є особливо актуальним. Застосування

положень теорії пружності матеріалів з урахуванням температурного впливу, механічних характеристик матеріалів і рівня статичних навантажень дозволить отримати більш точні результати розрахунків та сприятиме оптимізації підсилених конструкцій, підвищуючи їхню експлуатаційну надійність [159].

Для виконання статичних розрахунків труб, підслених методом гільзування, доцільно застосовувати числові методи, зокрема метод скінченних елементів. Це зумовлено тим, що наразі аналітичні підходи для точного визначення несучої здатності таких конструкцій ще не розроблені. Числові методи дозволяють враховувати складну геометрію утвореної конструкції, а також взаємодію між існуючою трубою, матеріалом для заповнення конструктивного зазору та гільзою, що суттєво впливає на точність отриманих результатів [128].

Для теоретичного обґрунтування НДС залізобетонних труб під впливом навантажень та температур з урахуванням запропонованих методів підсилення застосовано два теоретичні підходи:

- розрахунок залізобетонних труб на основі чисельно-аналітичного методу розрахунку за допомогою методу скінченних елементів;
- розрахунок залізобетонних труб на основі удосконаленої математичної моделі.

Метою є оцінювання НДС залізобетонної труби, а також ефективності її підслених варіантів – залізобетонної труби, підсленої методом гільзування, та залізобетонної труби, підсленої методом гільзування із додаванням арматурного каркасу. Оцінювання НДС виконується шляхом чисельного моделювання методом скінченних елементів та розрахунком на основі удосконаленої математичної моделі. Це дозволить отримати достовірні дані про розподіл напружень та деформацій у підслених конструкціях, а також оцінити точність моделювання як інструменту прогнозування поведінки підслених залізобетонних труб.

Для досягнення поставленої задачі необхідно виконати такі етапи:

- створити скінченно-елементну модель усіх складових залізобетонної труби та її підслених варіантів;

- виконати розрахунок та визначити значення максимальних напружень і деформацій, що виникають у залізобетонних трубах за різних рівнів навантаження та температур;
- удосконалити математичну модель для оцінювання НДС підсиленої залізобетонної труби та отримати значення максимальних напружень і переміщень, що виникають при сумісній дії тиску земляного насипу та впливу температур.

3.2. Визначення напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб методом скінченних елементів

3.2.1. Геометричні параметри та побудова скінчено-елементних моделей

Для проведення оцінювання НДС підсилених залізобетонних труб із врахуванням запропонованих методів підсилення при дії силових навантажень та температурних впливів використано ліцензійне програмне забезпечення FEMAP with NX Nastran. Відповідно до геометричних параметрів, визначених у розділі 2 (див. п.2.1–2.3), у програмному комплексі було створено три моделі, що відповідають різним конструктивним варіантам підсилення, для проведення розрахунків (рис. 3.2).

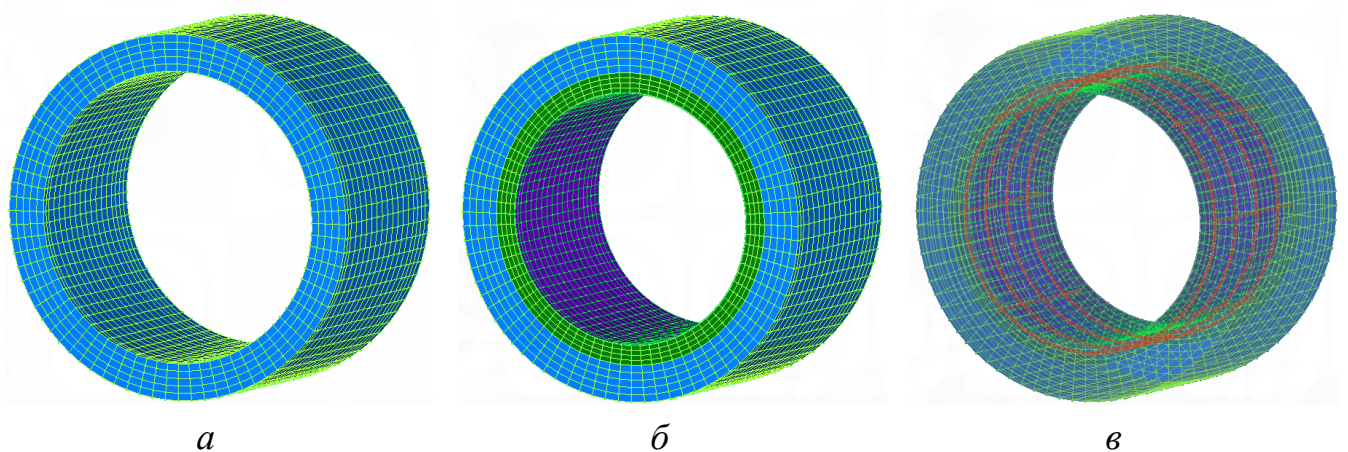


Рис. 3.2. Скінченно-елементні моделі залізобетонних труб: *а* – залізобетонна труба; *б* – залізобетонна труба підсилена гільзуванням; *в* – залізобетонна труба підсилена гільзуванням з додаванням арматурного каркасу

На першому етапі моделювання задано фізико-механічні характеристики матеріалів, використаних у розрахунках, зокрема для бетону та сталі відповідно до ДБН В.2.6-98:2009 [160] та ДСТУ 8803:2018 [161]. Це забезпечило коректність подальшого аналізу НДС та температурних впливів на конструкцію.

Механічні характеристики матеріалів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Характеристики матеріалів, що використовуються для розрахунку

Матеріал	Характеристика	Значення
Бетон труби	Марка бетону	C25/30
	Модуль пружності, E_1 (МПа)	31000
	Коефіцієнт Пуассона, ν_1	0,20
	Густина, ρ_1 (кг/м ³)	2400
	Міцність на стиск, σ_{c1} (МПа)	30,0
	Міцність на розтяг, σ_{t1} (МПа)	2,6
	Теплопровідність, k_1 (Вт/(м·°C))	19
	Коефіцієнт температурного розширення, α_1 (1/°C)	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Ремонтна суміш	Міцність через 28 діб (МПа)	35,0
	Модуль пружності, E_2 (МПа)	32000
	Коефіцієнт Пуассона, ν_2	0,20
	Густина, ρ_2 (кг/м ³)	2400
	Міцність на стиск, σ_{c2} (МПа)	35,0
	Міцність на розтяг, σ_{t2} (МПа)	3,0
	Теплопровідність, k_2 (Вт/(м·°C))	15
	Коефіцієнт температурного розширення, α_2 (1/°C)	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Армування та металева гільза	Клас сталі гільзи	Ст3
	Клас арматури	Ø6A240C
	Модуль пружності, E_3 (МПа)	210000
	Коефіцієнт Пуассона, ν_3	0,30
	Густина, ρ_3 (кг/м ³)	7850
	Міцність на стиск, σ_{c3} (МПа)	240
	Коефіцієнт температурного розширення, α_3 (1/°C)	$1,25 \cdot 10^{-5}$
	Міцність на розтяг, σ_{t3} (МПа)	370
	Теплопровідність, k_3 (Вт/(м·°C))	45

Для сітчастої моделі прийнято чотирикутні елементи. Кількість вузлів сітки складає – 19 944 шт., а кількість елементів – 15 744 шт.

На другому етапі змодельовано усі елементи необхідні для залізобетонної труби, а також елементи для її підсилення та створення сітки скінченних елементів. Геометричні моделі підсиленої труби розбито на тривимірні скінченні елементи (рис. 3.3). Для забезпечення сумісної роботи всіх шарів моделі забезпечено збігання всіх вузлів скінчено-елементної сітки для усіх елементів підсиленої труби.

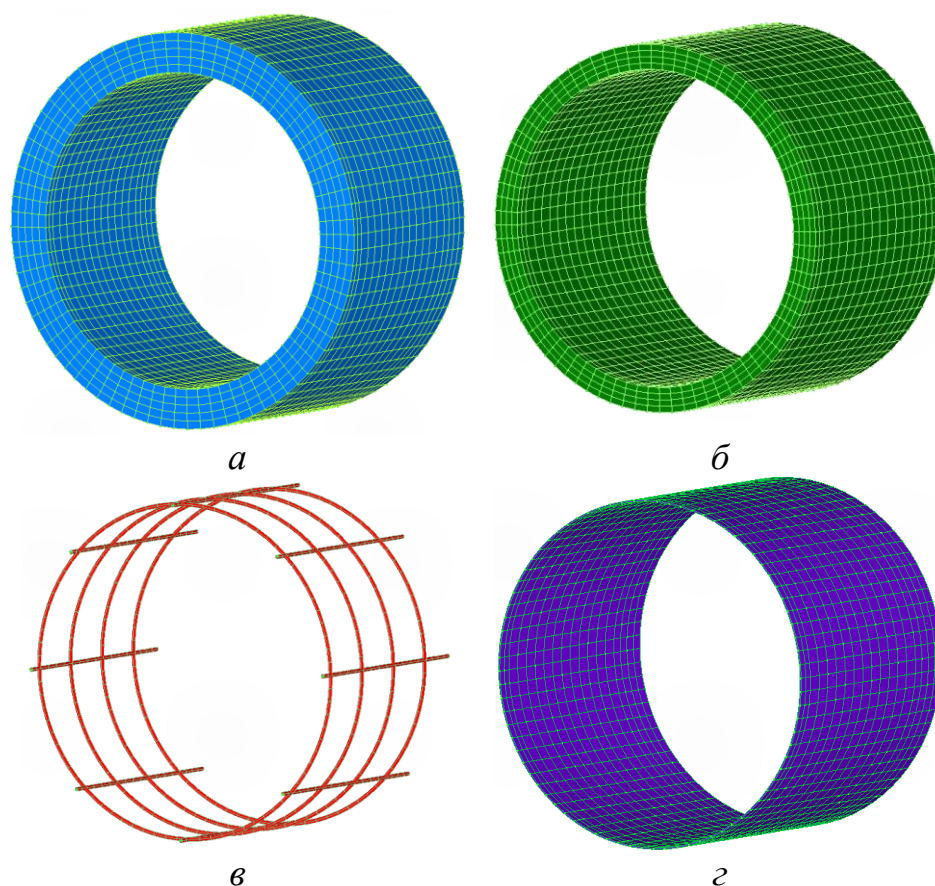


Рис. 3.3. Елементи скінчено-елементної моделі підсиленої труби: *a* – залізобетонна труба; *б* – шар ремонтної суміші; *в* – арматурний каркас; *г* – сталева гільза

На третьому етапі, після створення сітки скінченних елементів, три ряди вузлів на нижній зовнішній частині труби жорстко закріпили, забороняючи рух по всіх осях. Навантаження величиною F (кН) прикладено посередині верхньої зовнішньої частини труби на три ряди вузлів, як зображено на рис. 3.4. Прийнято чотири величини силових навантажень: $F_1 = 5$ кН; $F_2 = 8$ кН; $F_3 = 10$ кН; $F_4 = 15$ кН.

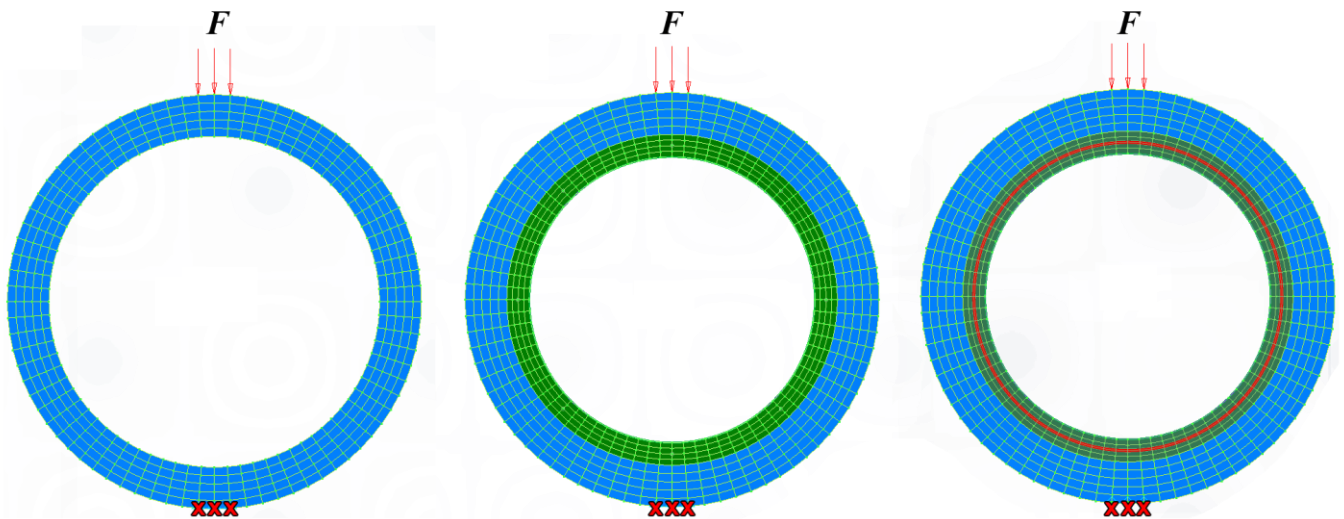


Рис. 3.4. Схема закріплення та прикладання навантаження

3.2.2. Оцінювання напружено-деформованого стану залізобетонних труб при дії силових навантажень

У результаті моделювання та статичного розрахунку в програмному середовищі Femap NX with Nastran отримано результати розподілу напружень в залежності від різних величин навантажень для трьох варіантів дослідних зразків, а саме для: залізобетонної труби (рис. 3.5), підсиленої залізобетонної труби методом гільзування (рис. 3.6.), підсиленої залізобетонної труби методом гільзування із додаванням арматурного каркасу (рис. 3.7.).

Розподіл переміщень підсиленої залізобетонної труби без підсилення наведено на рис. 3.8, підсиленої залізобетонної труби методом гільзування на рис. 3.9, а для підсиленої залізобетонної труби методом гільзування із додаванням арматурного каркасу — на рис. 3.10.

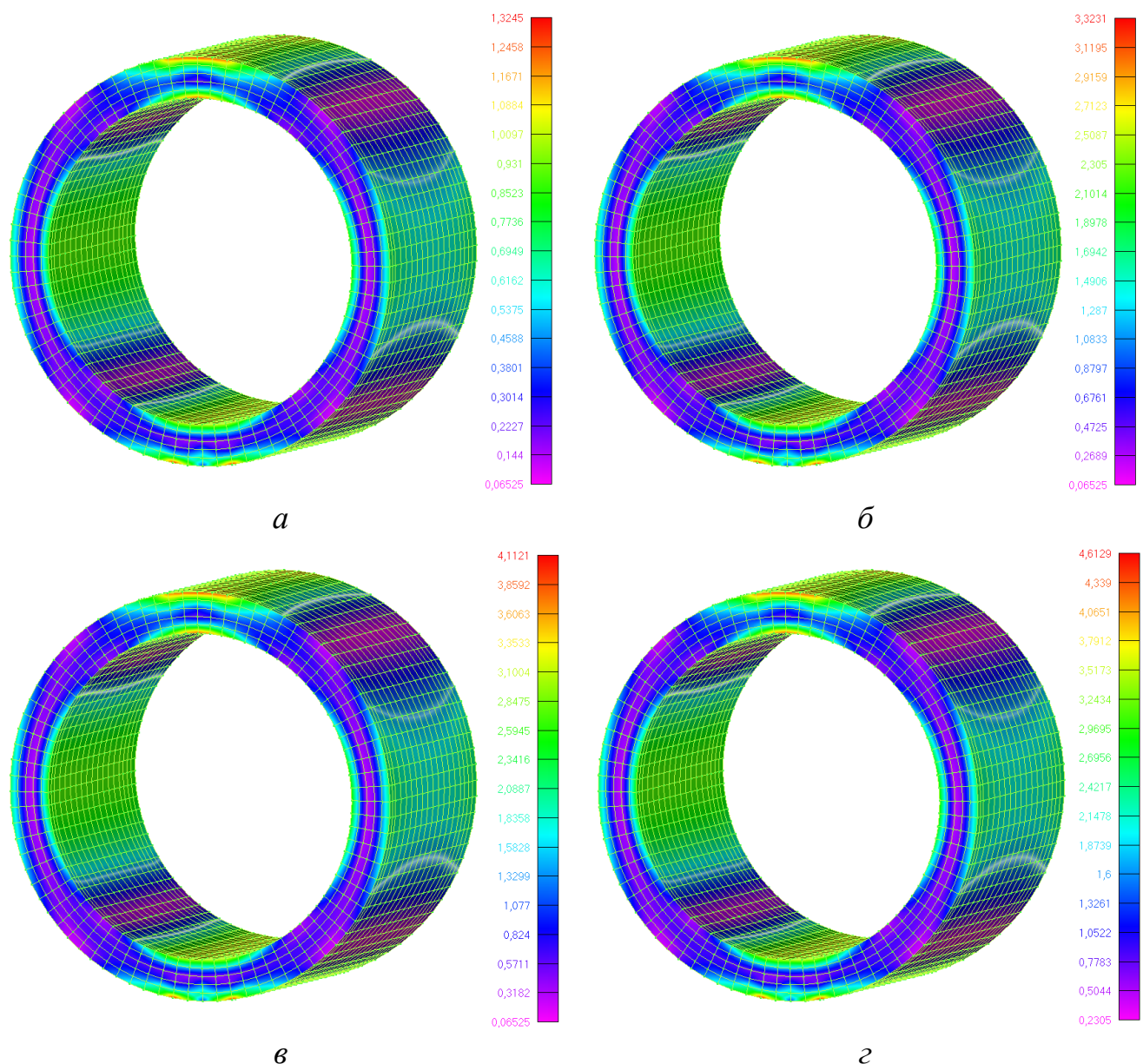


Рис. 3.5. Розподіл напружень залізобетонної труби в залежності від величин навантаження: *а* – 5,0 кН; *б* – 8,0 кН; *в* – 10,0 кН; *з* – 15,0 кН

Аналіз отриманих результатів розподілу напружень (рис. 3.5) свідчить про те, що в залізобетонній трубі без підсилення зі збільшенням навантаження відбувається зростання максимальних напружень. Зокрема, при прикладенні навантаження 5,0 кН максимальні напруження становлять 1,32 МПа, при навантаженні 8,0 кН вони зростають до 3,32 МПа, а за подальшого підвищення до 10,0 кН – до 4,11 МПа. При збільшенні навантаження до 15,0 кН напруження досягають 4,61 МПа, що свідчить про подальше збільшення напружено-деформованого стану конструкції.

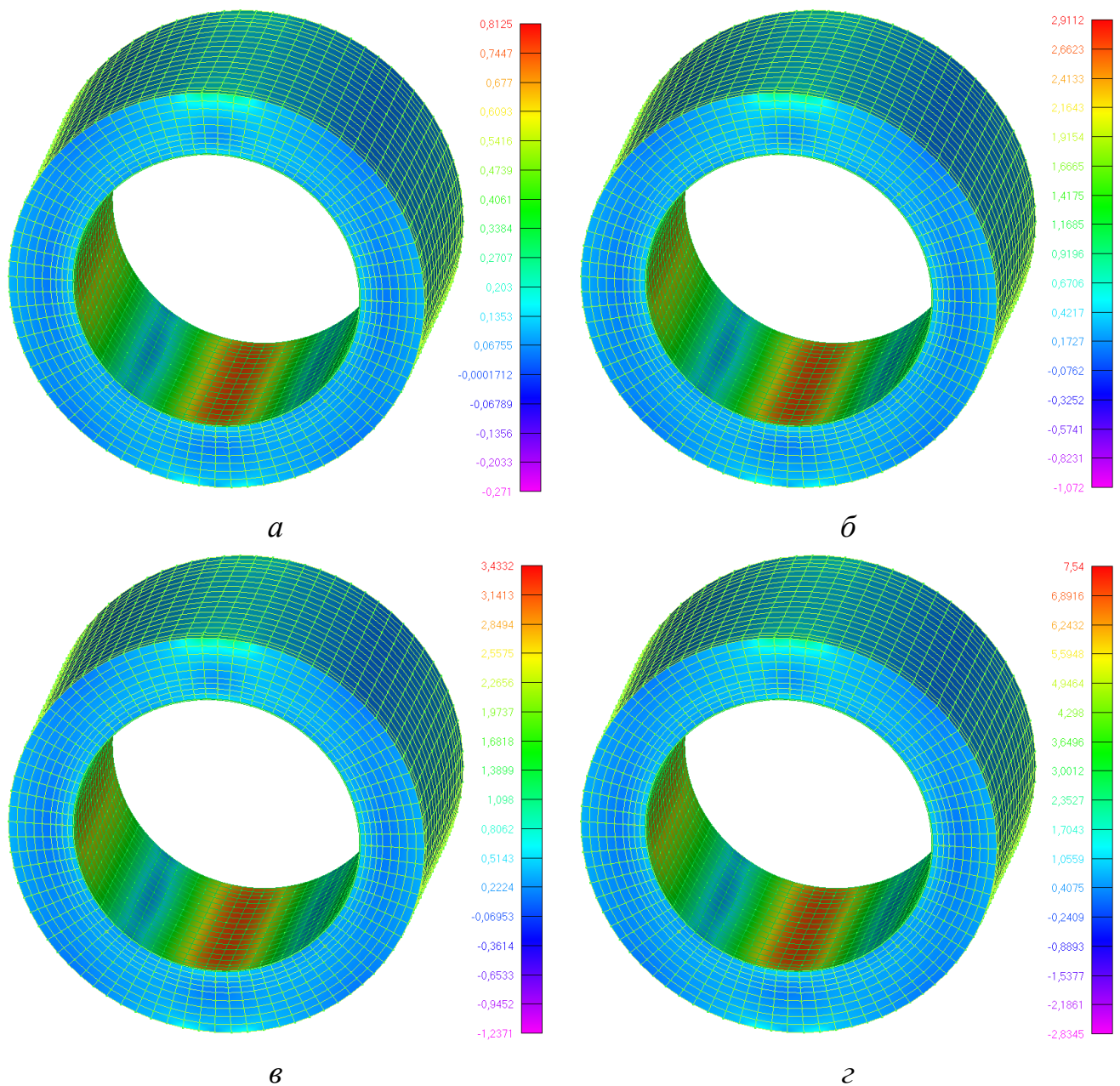


Рис. 3.6. Розподіл напружень підсиленої залізобетонної труби методом гільзування у залежності від величин навантаження: *a* – 5,0 кН; *б* – 8,0 кН; *в* – 10,0 кН; *г* – 15,0 кН

Аналіз результатів, наведених на рис. 3.6, демонструє зміну напружень у залізобетонній трубі після її підсилення методом гільзування. Зокрема, при навантаженні 5,0 кН максимальні напруження становлять 0,81 МПа, що значно менше, аніж у непідсиленій конструкції. Подальше збільшення навантаження до 8,0 кН спричиняє підвищення напружень до 2,91 МПа, а при 10,0 кН вони сягають 3,43 МПа. За навантаження 15,0 кН спостерігається максимальне значення напружень – 7,54 МПа.

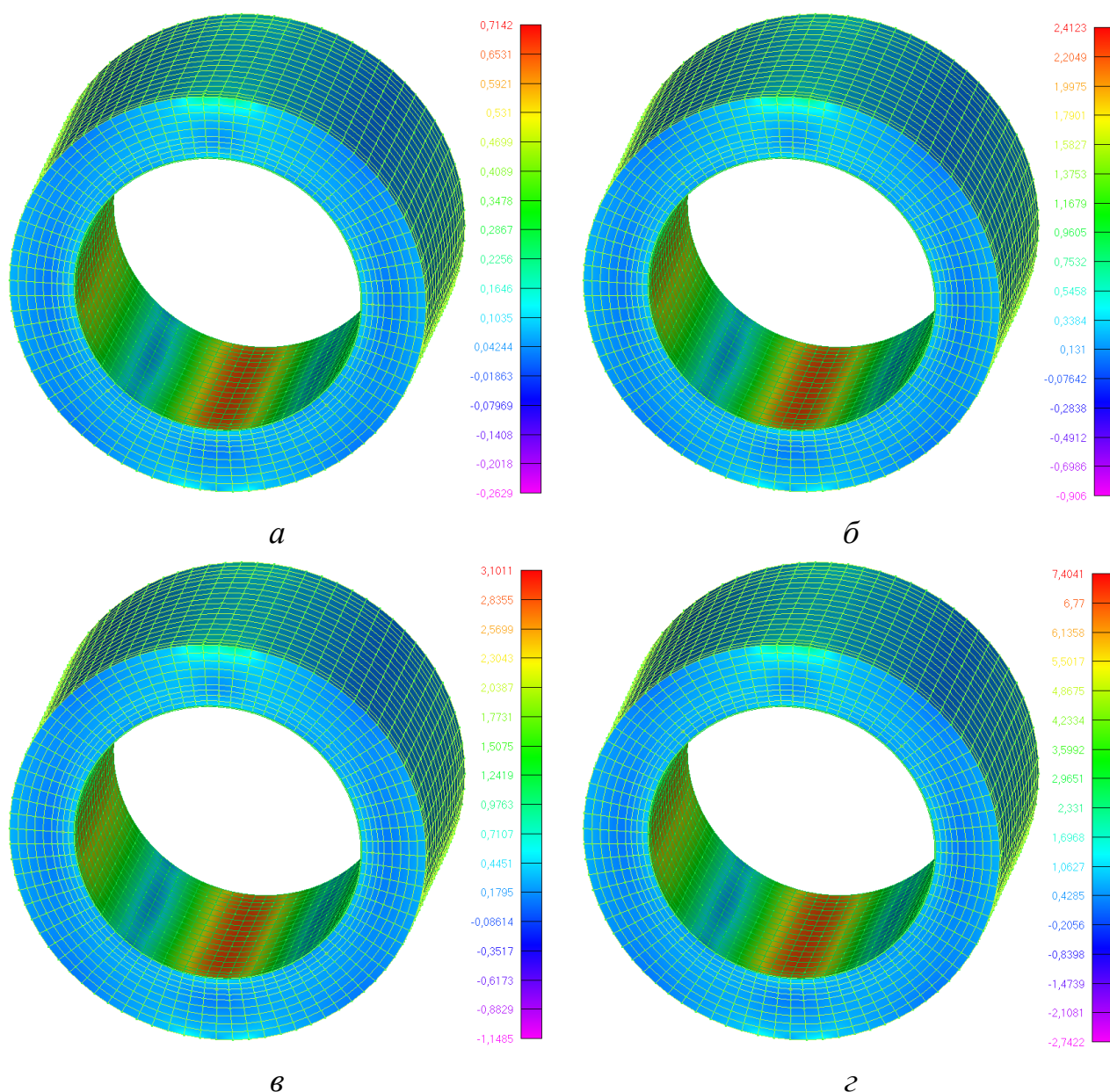


Рис. 3.7. Розподіл напружень підсиленої залізобетонної труби методом гільзування з додаванням арматурного каркасу в залежності від величин навантаження: *a* – 5,0 кН; *б* – 8,0 кН; *в* – 10,0 кН; *г* – 15,0 кН

Аналіз розподілу напружень у залізобетонній трубі, підсиленій методом гільзування з додаванням арматурного каркасу (рис. 3.7) показує, що при навантаженні 5,0 кН максимальні напруження становлять 0,71 МПа, що є меншим порівняно з варіантом без арматурного каркасу (рис. 3.6). При збільшенні навантаження до 8,0 кН напруження зростають до 2,41 МПа, а при навантаженні 10,0 кН досягають 3,1 МПа. Максимальне значення напружень за навантаження 15,0 кН становить 7,4 МПа.

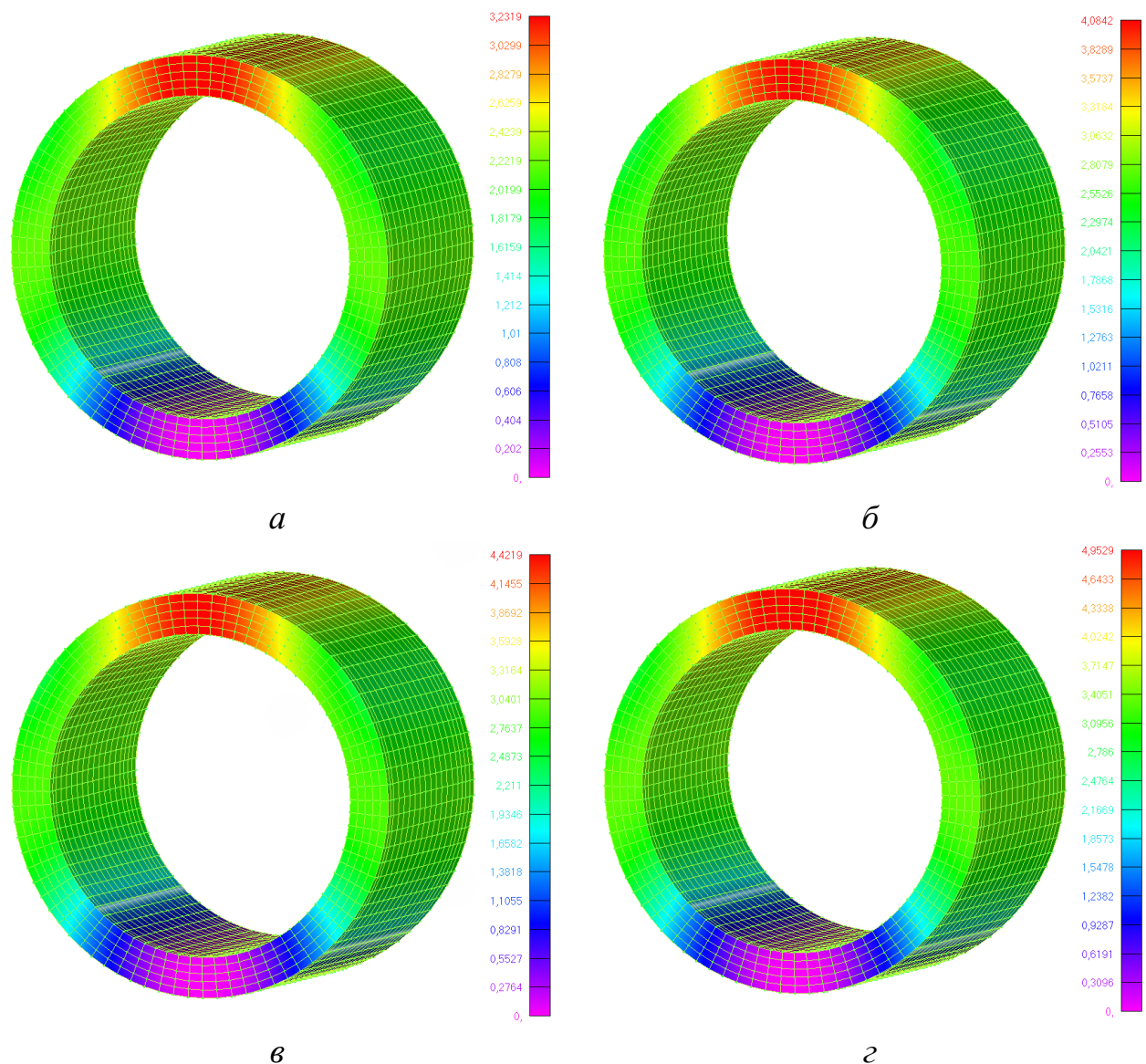


Рис. 3.8. Розподіл переміщень залізобетонної труби в залежності від величин навантаження: *а* – 5,0 кН; *б* – 8,0 кН; *в* – 10,0 кН; *г* – 15,0 кН

Аналіз результатів моделювання дозволяє оцінити характер розподілу переміщень у залізобетонній трубі залежно від величини прикладеного навантаження (рис. 3.8). Зокрема, при навантаженні 5,0 кН максимальне переміщення становить 3,23 мм. Із зростанням навантаження до 8,0 кН величина переміщення збільшується до 4,08 мм, а при подальшому підвищенні до 10,0 кН досягає 4,42 мм. За максимального навантаження в 15,0 кН переміщення зростає до 4,95 мм. Отримані дані свідчать про закономірне збільшення деформацій труби зі зростанням навантаження, що відповідає очікуваному напружено-деформованому стану конструкції.

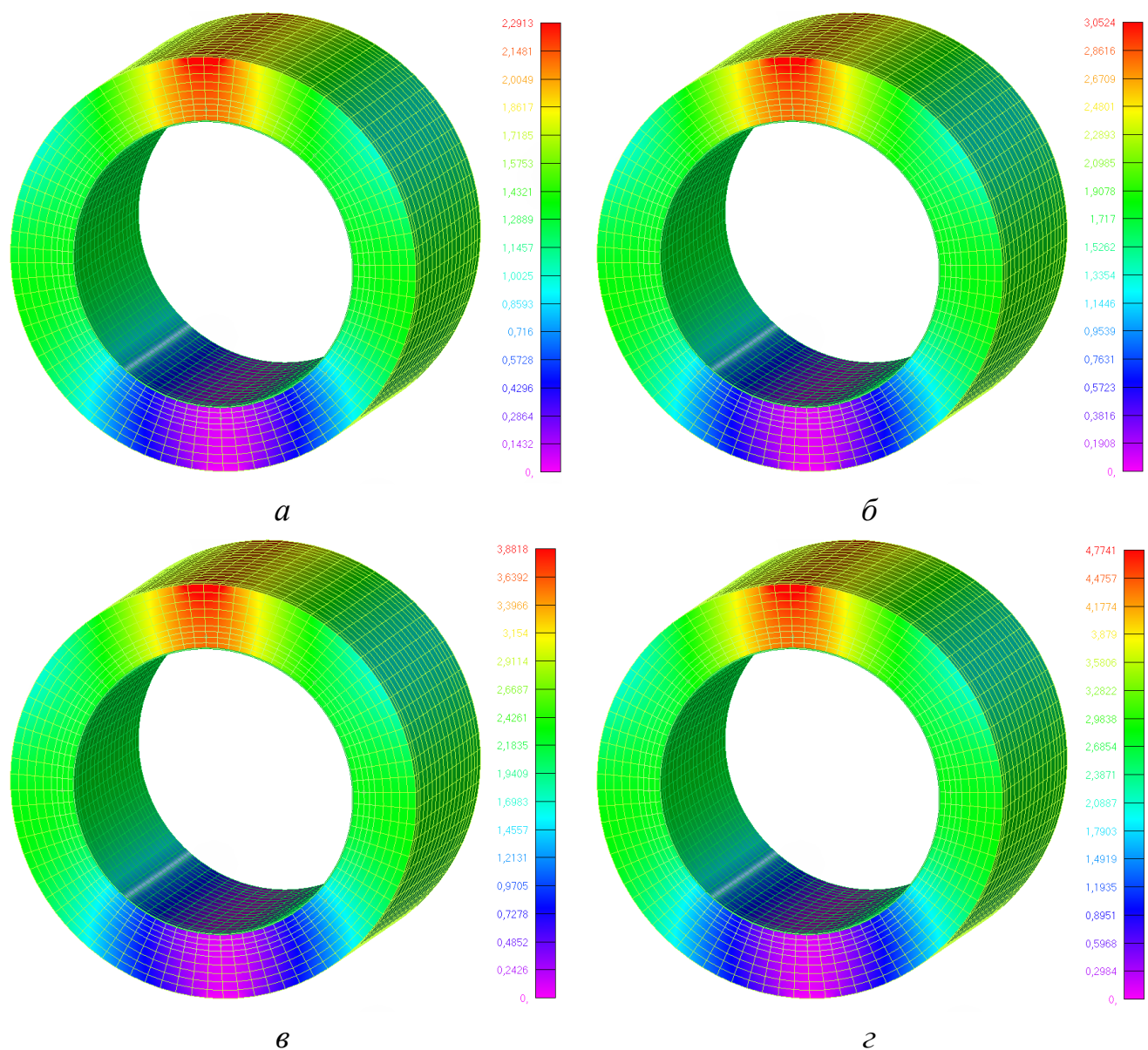


Рис. 3.9. Розподіл переміщень підсиленої залізобетонної труби методом гільзування в залежності від величин навантаження: *а* – 5,0 кН; *б* – 8,0 кН; *в* – 10,0 кН; *г* – 15,0 кН

Результати моделювання демонструють зміни величини переміщень підсиленої залізобетонної труби методом гільзування, залежно від прикладеного навантаження (рис. 3.9). За навантаження 5,0 кН максимальне переміщення складає 2,29 мм. При збільшенні навантаження до 8,0 кН воно зростає до 3,05 мм, а при подальшому підвищенні до 10,0 кН сягає 3,88 мм. Найбільше переміщення, зафіксоване при навантаженні 15,0 кН, становить 4,77 мм. Порівняльно із непідсиленою трубою спостерігається зменшення деформацій, що підтверджує ефективність методу гільзування у підвищенні жорсткості конструкції.

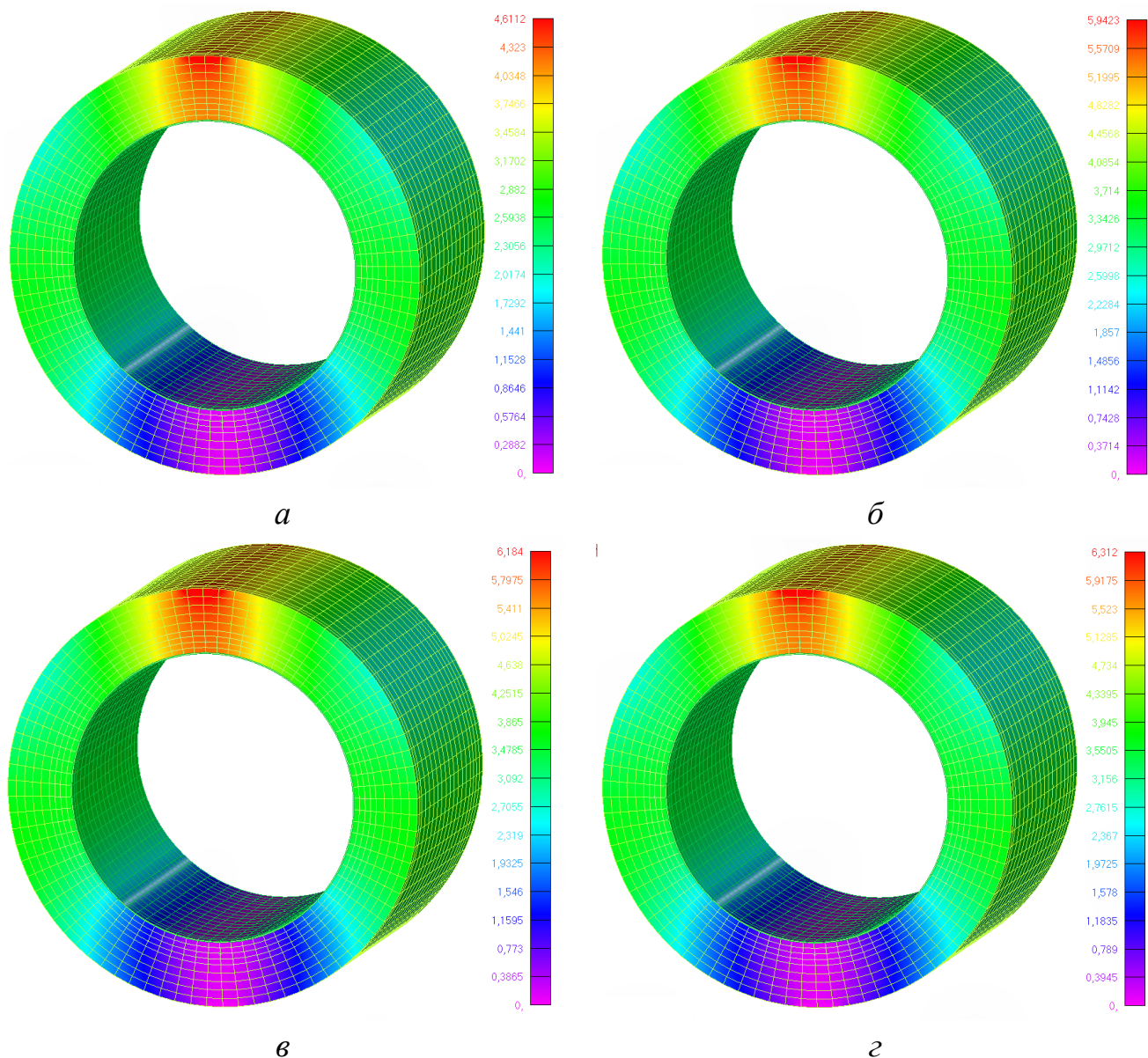


Рис. 3.10. Розподіл переміщень підсиленої залізобетонної труби методом гільзування з додаванням арматурного каркасу в залежності від величин навантаження:

a – 5,0 кН; *б* – 8,0 кН; *в* – 10,0 кН; *г* – 15,0 кН

Результати числового моделювання свідчать про зміну величини переміщень залізобетонної труби, підсиленої методом гільзування з додаванням арматурного каркасу, залежно від прикладеного навантаження (рис. 3.10). За навантаження 5,0 кН максимальне переміщення складає 4,61 мм. Зі збільшенням навантаження до 8,0 кН воно досягає 5,94 мм, а при 10,0 кН – 6,18 мм. Найбільше значення переміщень, яке

спостерігається при навантаженні 15,0 кН, становить 6,31 мм. Порівняно з трубою, підсиленою лише гільзуванням, додавання арматурного каркасу призводить до збільшенні деформативності без руйнування.

Детальніший розподіл напружень та деформацій для арматурного каркасу та металеві труби для навантажень 8,0 кН та 15,0 кН наведено на рис. 3.11 та рис. 3.12.

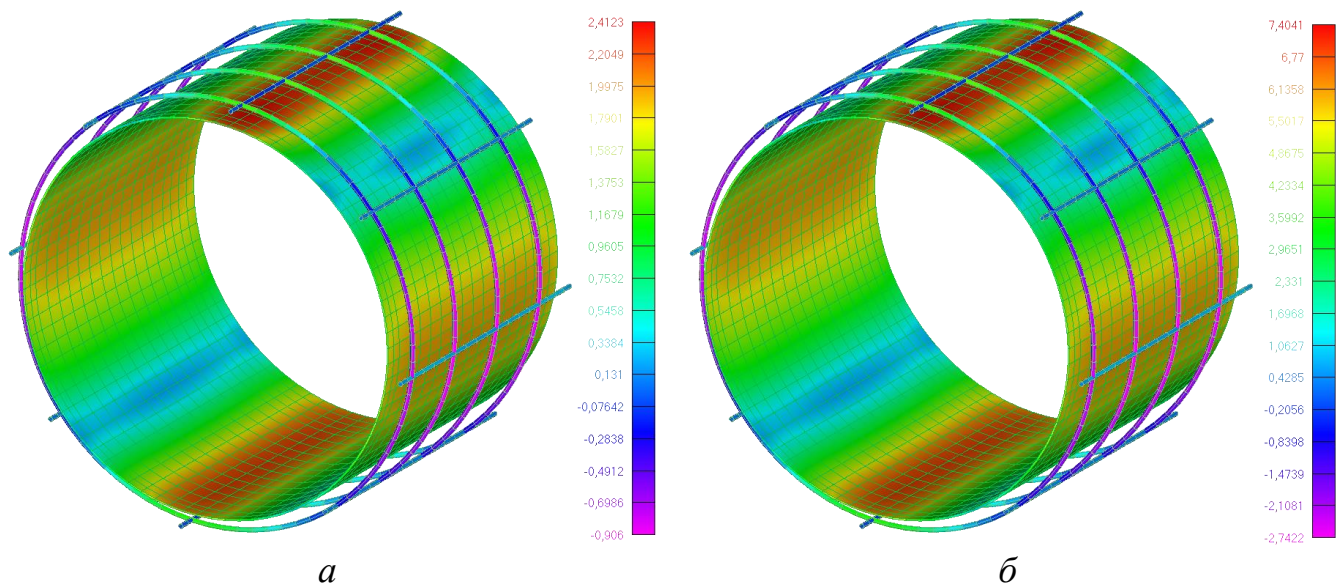


Рис. 3.11. Розподіл напружень просторового арматурного каркасу та металеві труби: *a* – 8,0 кН; *б* – 15,0 кН

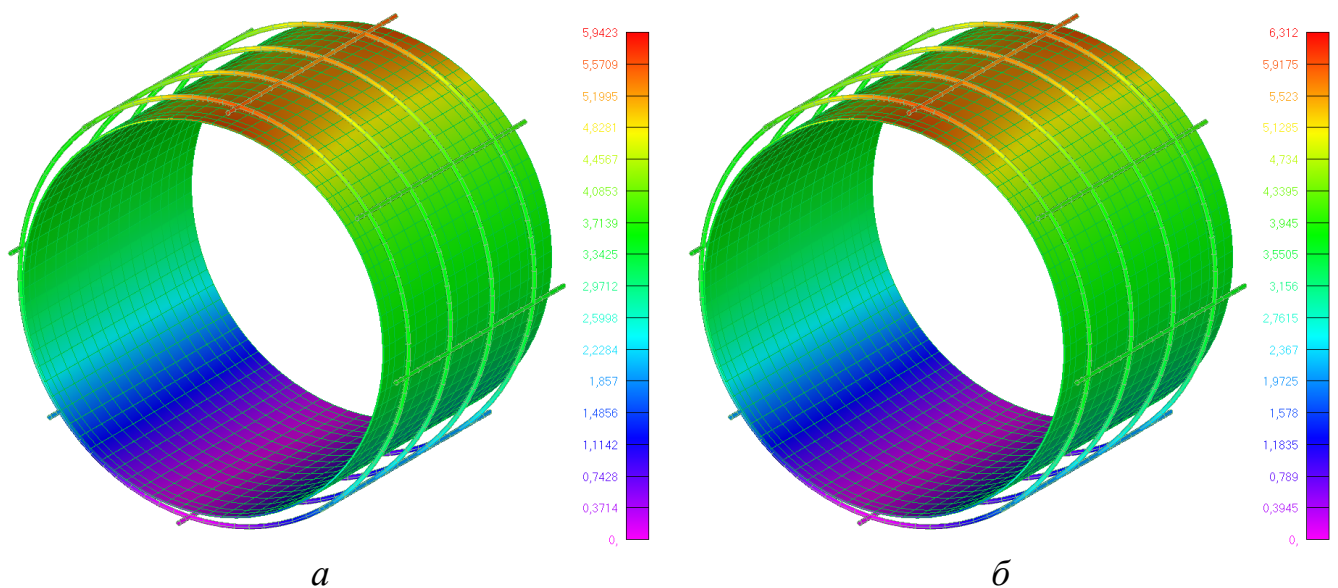


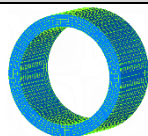
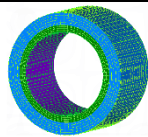
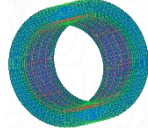
Рис. 3.12. Розподіл переміщень просторового арматурного каркасу та металеві труби: *a* – 8,0 кН; *б* – 15,0 кН

Із рис. 3.5 – 3.10 видно, що максимальні значення напружень та переміщень для залізобетонної труби та обох варіантів її підсилення виникають у вертикальному напрямку, зокрема в зонах, що відповідають схемі статичного розрахунку круглих труб (див. п. 1.3).

Значення максимальних деформацій та напружень для трьох моделей залізобетонної труби наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Максимальні деформації та напруження в залежності від прикладеного навантаження

Тип труби	Ескіз	Максимальні деформації, (мм)				Максимальні напруження, (МПа)			
		Навантаження, F (кН)							
		5,0	8,0	10,0	15,0	5,0	8,0	10,0	15,0
Залізобетонна труба		3,23	4,08	4,42	4,95	1,32	3,32	4,11	4,61
Гільзування		2,29	3,05	3,88	4,77	0,81	2,91	3,34	7,54
Арматурний каркас		4,61	5,94	6,18	6,31	0,71	2,41	3,10	7,40

Аналіз даних, наведених у табл. 3.2, свідчить, що при навантаженні 15 кН максимальні деформації для залізобетонної труби без підсилення становлять 4,61 мм. При підсиленні методом гільзування максимальні деформації складають 7,54 мм, а при додатковому застосуванні арматурного каркасу – 7,40 мм.

При цьому на межі контакту металеві труби з ремонтною сумішшю спостерігається значний перепад деформацій, що зумовлено відмінностями у фізико-механічних властивостях цих матеріалів.

Отримані результати демонструють закономірності зміни напружено-деформованого стану залізобетонної труби та дозволяють оцінити її поведінку при різних рівнях зовнішніх впливів. Виявлені залежності є важливими для оцінювання

граничного стану конструкції та визначення моменту, коли підсилення стає необхідним для запобігання руйнуванню.

3.2.3. Оцінювання напружено-деформованого стану залізобетонних труб при дії температурних впливів

Для розв'язання крайової задачі теплопровідності підсиленої залізобетонної труби встановлено початкову температуру, яка приймається однаковою для всіх вузлів скінченно-елементної сітки. Значення температури у вузлах скінченно-елементної моделі труби прийнято рівним $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Розподіл температури на зовнішній поверхні труби визначено ступінчасто в межах від $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а сам розподіл температурних значень задано безпосередньо у вузлах сітки моделі на зовнішній оболонці труби.

Картину розподілу температури у вигляді температурного поля по товщині підсиленої залізобетонної труби наведено на рис. 3.13.

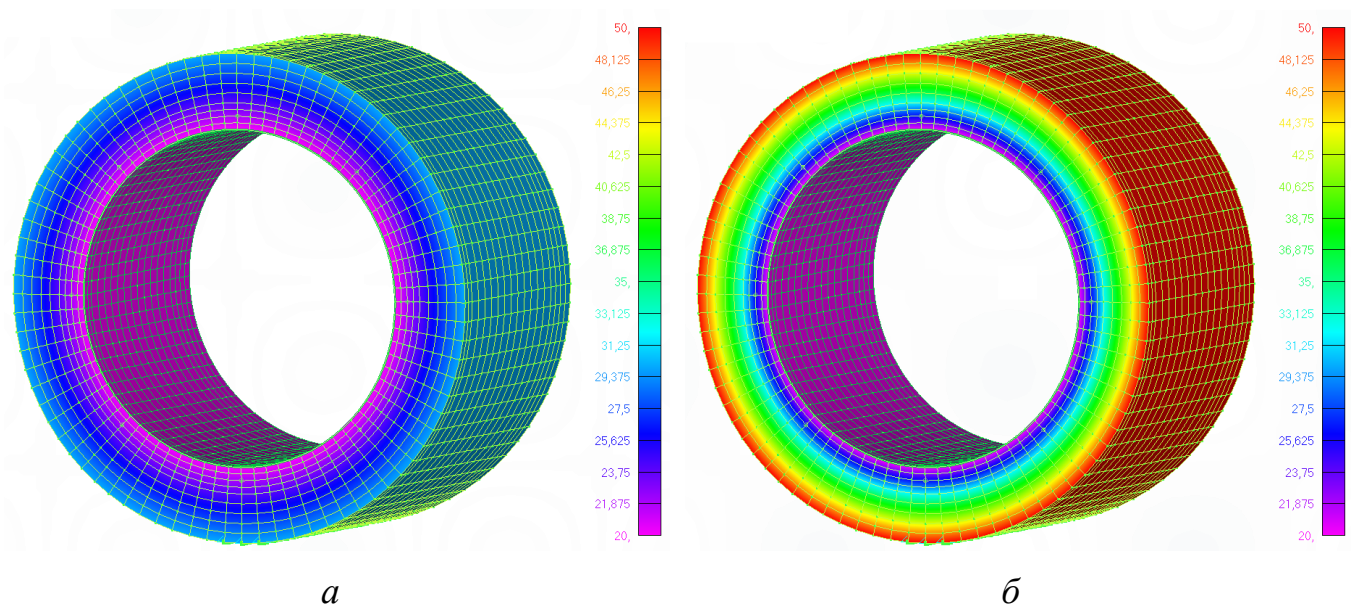


Рис. 3.13. Розподіл температурного поля в залежності від величини температурного впливу: *a* – $30\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* – $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналіз отриманого температурного поля показав, що різниця температур між внутрішньою та зовнішньою поверхнями труби становить від $+10^{\circ}\text{C}$ до $+30^{\circ}\text{C}$. Визначення температурних градієнтів підтвердило, що найбільш значні зміни температури відбуваються по товщині труби, тоді як у поперечному та поздовжньому напрямках ці градієнти є менш вираженими.

Особливу увагу слід приділити розподілу температурних градієнтів у поперечному перерізі труби, оскільки вони відображають нерівномірність теплового розподілу через різні фізико-механічні властивості матеріалів у багатошаровій конструкції [162].

Результати розрахунку напружень Мізеса, які виникають у трубі під впливом підвищених температур навколишнього середовища, наведено на рис. 3.14.

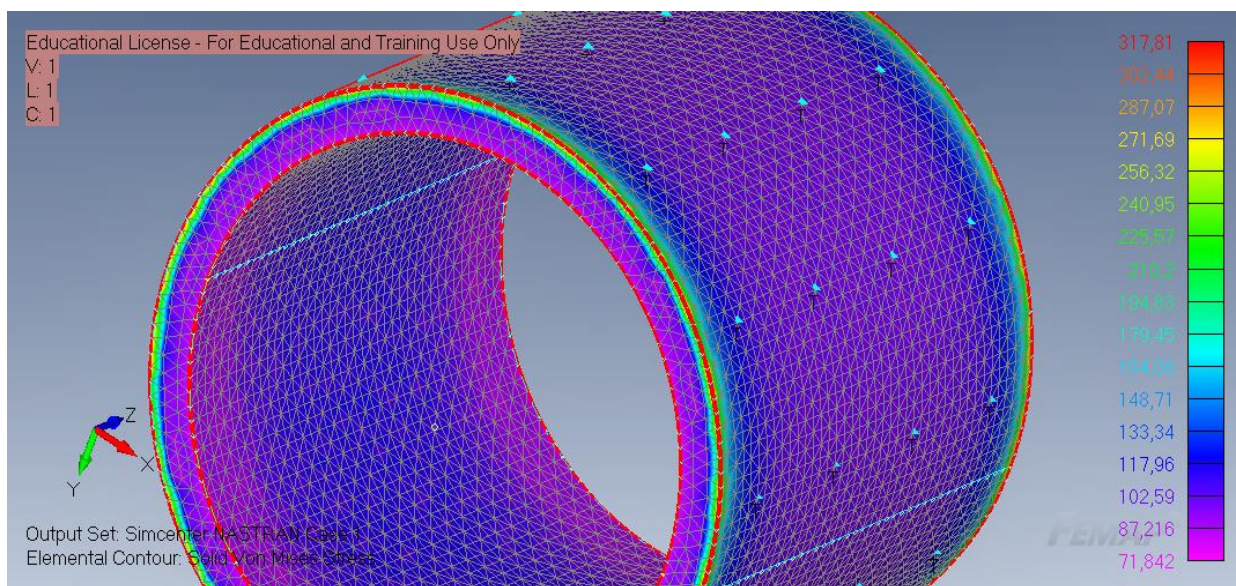


Рис. 3.14. Розподіл напружень Мізеса при дії температурних впливів

Встановлено, що максимальні напруження формуються в місці контакту металевго підсилювального елемента із новим бетоном, а їх значення досягає 302,44 кПа.

Отримані значення температурних напружень є досить високими, що підкреслює необхідність урахування кліматичних температурних впливів при оцінці НДС залізобетонних труб, підсилених металевою гофрованою конструкцією. Поєднання температурних напружень із напруженнями, що виникають внаслідок

руху транспортних засобів, може призводити до перевищення допустимих меж міцності матеріалу труби.

Результати розрахунку нормальних напружень у трубі наведено на рис. 3.15.

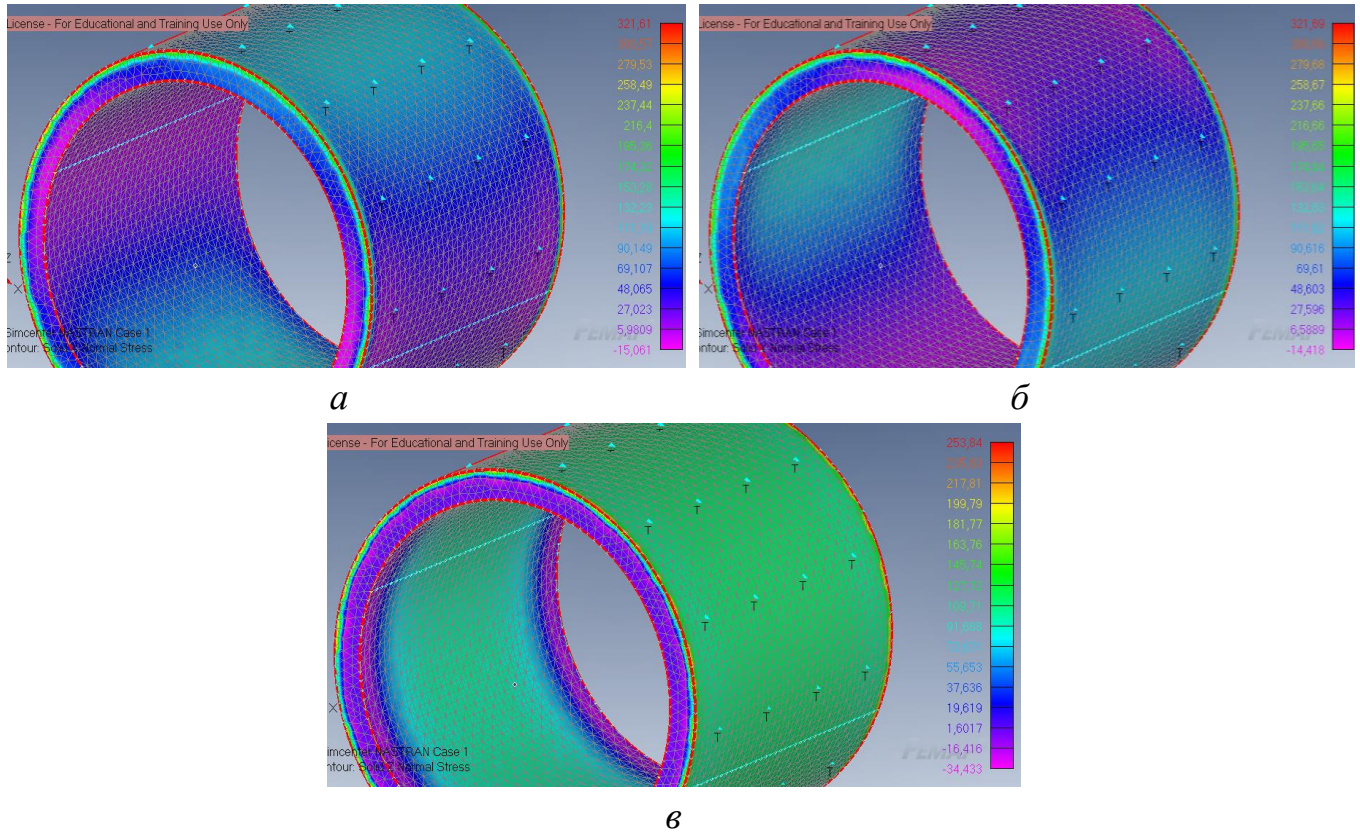


Рис. 3.15. Результат визначення нормальних напруження у трубі: *a* – поперечному напрямку; *б* – повздовжньому нарямку; *в* – вертикальному напрямку

Найвищі значення температурних напружень спостерігаються в зоні контакту металевої гільзи із бетоном. Конкретні значення нормальних напружень у різних напрямках такі: у поперечному – 321,61 кПа, у поздовжньому – 321,61 кПа, а у вертикальному (по товщині) – 253,84 кПа.

Розподіл загальних деформацій, що виникають у трубі внаслідок кліматичних температурних перепадів, наведено на рис. 3.16. Встановлено, що максимальні значення деформацій становлять 0,1492 мм.

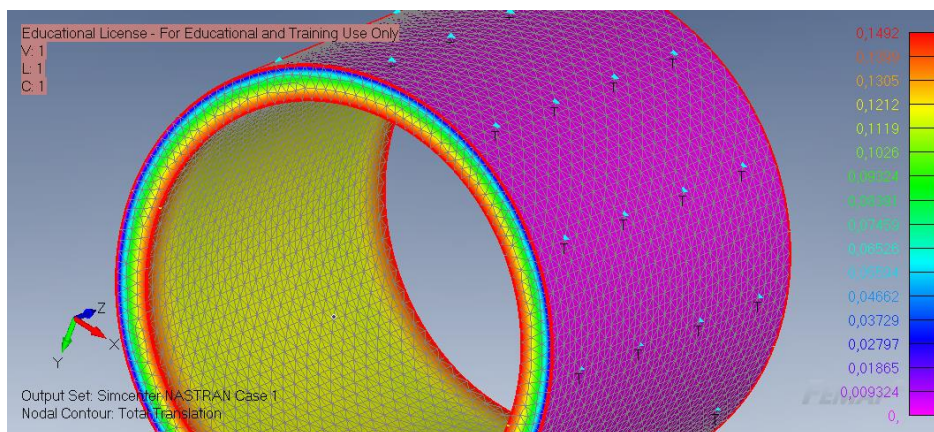


Рис. 3.16. Розподіл загальних деформацій у трубі при дії температурних впливів

Результати розрахунку дотичних напружень у трубі наведено на рис. 3.17. Найбільші значення дотичних напружень у різних напрямках такі: у поздовжньому – 73,22 кПа, у поперечному – 173,3 кПа, а у вертикальному – 172,44 кПа.

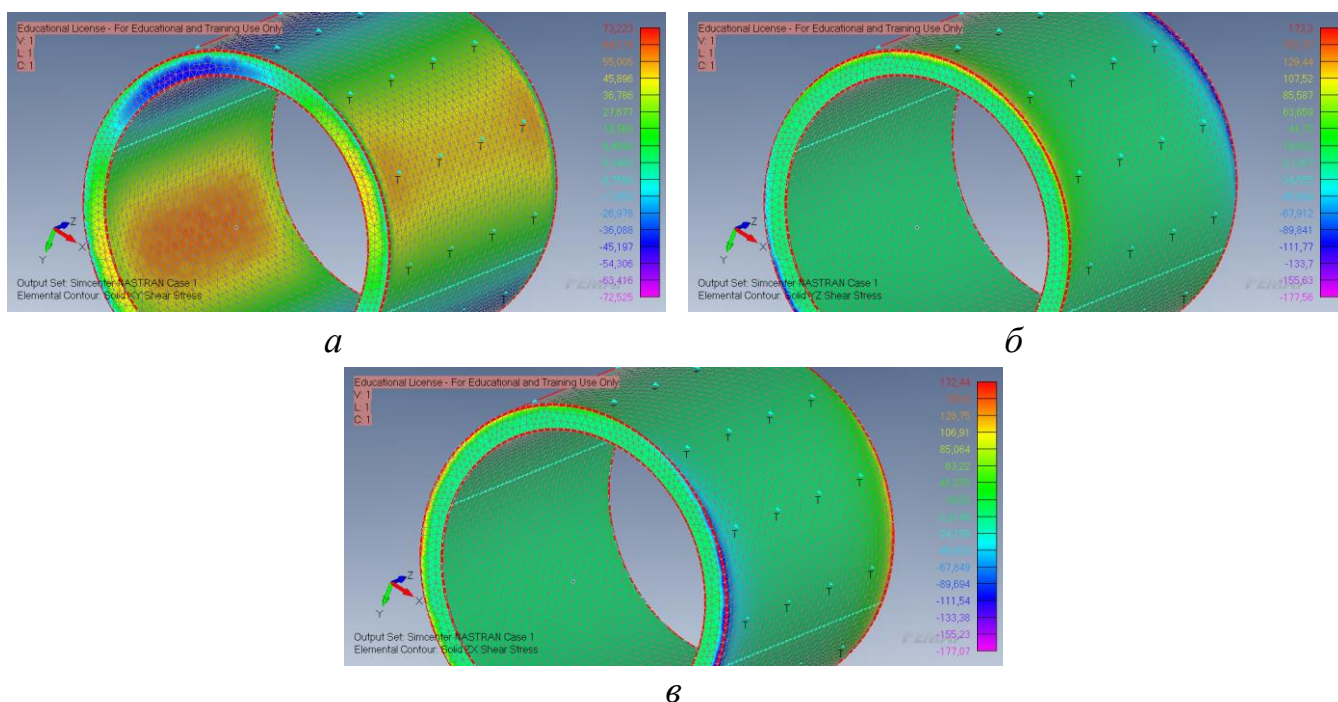


Рис. 3.17. Результат визначення дотичних напружень у трубі: *а* – нормальні до осі *x*, у напрямку *y*; *б* – нормальні до осі *y*, у напрямку *z*; *в* – нормальні до осі *z*, у напрямку *x*

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що максимальні дотичні напруження зосереджуються у зоні контакту металевої конструкції із бетоном, досягаючи максимального значення 173,3 кПа по товщині труби. Такі рівні напружень можуть

сприяти утворенню тріщин у бетоні, що може негативно позначитися на довговічності підсиленої конструкції підсиленої труби.

Проведене дослідження температурного впливу на НДС залізобетонної труби, підсиленої металевою гільзою, дозволяє зробити висновок про значний рівень температурних напружень, що виникають у конструкції. Це підкреслює необхідність врахування температурних впливів при проєктуванні підсилення залізобетонних труб методом гільзування, оскільки ігнорування цих факторів може призвести до подальшого розвитку дефектів у конструкції.

3.3. Одновимірна математична модель оцінювання напружено-деформованого стану

3.3.1. Геометричні параметри та матеріали досліджуваної тришарової підсиленої труби

При ремонті дефектних труб методом гільзування утворюється багатошарова споруда, елементи якої значно відрізняються один від одного фізико-механічними параметрами конструктивних матеріалів. Геометричні параметри залізобетонної труби підсиленої методом гільзування прийнято відповідно до обраних у розділі 2 (див. п. 2.2). Геометрична модель підсиленої залізобетонної труби наведена на рис. 3.18.

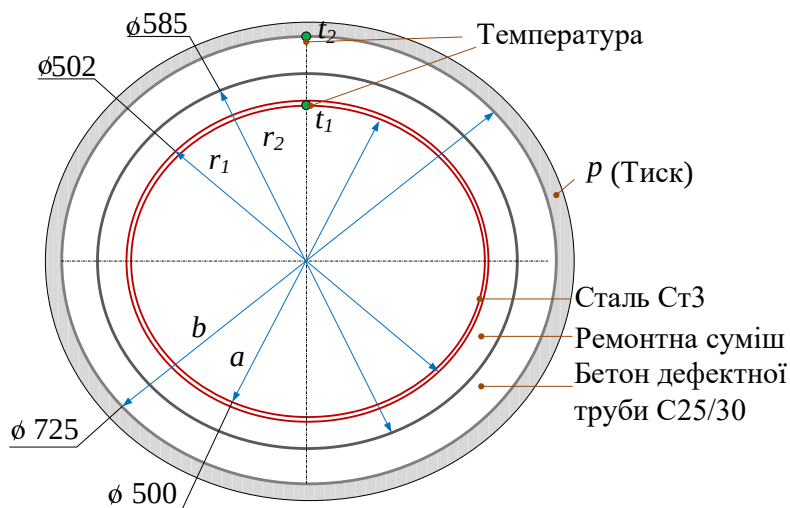


Рис. 3.18. Геометрична модель підсиленої багатошарової труби

Для оцінювання напружень та деформацій задано наступні геометричні параметри підсиленої залізобетонної труби: $a=500$ мм; $r_1=502$ мм; $r_2=585$ мм; $b=725$ мм.

Фізико-механічні параметри шарів конструкції підсиленої залізобетонної труби: металева труба, що виготовлена із сталі Ст3: $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\nu_1 = 0,3$; $\alpha_1 = 1,25 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$, $\kappa_1=45$ Вт/(м $\cdot^\circ\text{C}$); ремонтна суміш між металевою трубою та залізобетонною (міцність 35 МПа): $E_2 = 3,6 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_2 = 0,25$; $\alpha_2 = 1,0 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$, $\kappa_2=1,51$ Вт/(м $\cdot^\circ\text{C}$); залізобетонна труба (бетон С25/30): $E_3 = 3,9 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_3 = 0,25$; $\alpha_3 = 1,0 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$, $\kappa_3=1,69$ Вт/(м $\cdot^\circ\text{C}$).

Аналіз НДС тришарової конструкції виконано з урахуванням температурного перепаду між зовнішньою та внутрішньою поверхнями підсиленої труби, що становить $\Delta t=10$ $^\circ\text{C}$. У процесі розрахунків враховано сумісну дію температурного впливу та статичних навантажень. Зокрема, поряд із температурним перепадом було задано також навантаження від ґрунтової засипки висотою 1,0 м, яке становить 19,4 кПа. Розрахунок величини цього навантаження проведено згідно з методикою, наведеною у праці [164].

3.3.2. Удосконалена математична модель для оцінювання напружено-деформованого стану підсиленої тришарової труби

Коссак О. С., Савула Я. Г., Стягар А. О. та Макар І. І. у працях [165, 166] вказують, що для визначення напруженого стану масивних конструктивних елементів доцільним є застосування рівнянь теорії термопружності або пружності, тоді як для розрахунку тонкостінних елементів найкраще підходять рівняння теорії оболонок.

Для аналізу НДС тришарової труби використано геометричну модель, зображену на рис. 3.18. В її основу покладено модель, запропоновану у роботі [168], яка застосовується для оцінювання НДС підсиленої труби з урахуванням лише перепаду температури навколишнього середовища.

Удосконалення моделі полягає у доповненні її врахуванням додаткового навантаження у вигляді сили тиску ґрунтової засипки [163]. Для цього прийнято

кусково-однорідну тришарову циліндричну оболонку, що розташовується у межах досліджуваної області.

$$(V) = \{(r, \varphi, z) : a \leq r \leq b, 0 \leq \varphi < 2\pi, 0 \leq z \leq l\},$$

де r, φ, z – система циліндричних координат.

На основі рівнянь, наведених у роботі [168] визначаємо розподіл температурного поля у тришаровій підсиленій залізобетонній трубі:

$$t = \begin{cases} C_1 \ln r + C_2 & \text{при } a \leq r \leq r_1, \\ C_3 \ln r + C_4 & \text{при } r_1 < r \leq r_2, \\ C_5 \ln r + C_6 & \text{при } r_2 < r \leq b, \end{cases} \quad (3.1)$$

Для визначення сталих інтегрування $C_1 \dots C_6$ використано формули, що наведені у роботі [168].

Для удосконаленої моделі прийнято, що на поверхнях $r = a$ та $r = b$ діє навантаження p . Модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та коефіцієнт лінійного теплового розширення оболонки визначаються за такими формулами:

$$E = \begin{cases} E_1 & \text{при } a \leq r \leq r_1, \\ E_2 & \text{при } r_1 < r \leq r_2, \\ E_3 & \text{при } r_2 < r \leq b, \end{cases} \quad \nu = \begin{cases} \nu_1 & \text{при } a \leq r \leq r_1, \\ \nu_2 & \text{при } r_1 < r \leq r_2, \\ \nu_3 & \text{при } r_2 < r \leq b, \end{cases} \quad \alpha = \begin{cases} \alpha_1 & \text{при } a \leq r \leq r_1, \\ \alpha_2 & \text{при } r_1 < r \leq r_2, \\ \alpha_3 & \text{при } r_2 < r \leq b. \end{cases}$$

Аналіз НДС тришарової труби здійснюється на основі рівнянь і співвідношень теорії пружності. Приймається, що переміщення u_φ та u_z дорівнюють нулю, що зумовлює обнулення компонент $e_{r\varphi}, e_{rz}, e_{\varphi z}, e_{zz}$ тензора деформацій, а також компонент $\sigma_{r\varphi}, \sigma_{rz}, \sigma_{\varphi z}$ тензора напружень. За таких умов рівняння рівноваги набуває наступного вигляду:

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) = 0, \quad (3.2)$$

де $\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}$ – компоненти тензора напружень.

Записуємо співвідношеннями Дюамеля – Неймана, що зв'язує напруження $\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{zz}$ та деформації $e_{rr}, e_{\varphi\varphi}, e_{zz}$ таким співвідношенням:

$$\sigma_{rr} = 2\mu e_{rr} + \lambda e - \beta t, \sigma_{\varphi\varphi} = 2\mu e_{\varphi\varphi} + \lambda e - \beta t, \sigma_{zz} = 2\mu e_{zz} + \lambda e - \beta t, \quad (3.3)$$

$$\text{де } e = e_{rr} + e_{\varphi\varphi}, \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \beta = \alpha(3\lambda + 2\mu).$$

Між деформаціями $e_{rr}, e_{\varphi\varphi}$ та переміщенням u_r існує наступне співвідношення:

$$e_{rr} = \frac{du_r}{dr}, e_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}. \quad (3.4)$$

При $r=a$ і $r=b$ та заданні навантажень p отримаємо наступне:

$$\sigma_{rr}|r=a=0, \sigma_{rr}|r=b=-p. \quad (3.5)$$

Умови ідеального механічного контакту виконуються у випадку $r=r_1$ і $r=r_2$:

$$\begin{aligned} u_r|r=r_1-0 &= u_r|r=r_1+0, \sigma_{rr}|r=r_1-0 = \sigma_{rr}|r=r_1+0, \\ u_r|r=r_2-0 &= u_r|r=r_2+0, \sigma_{rr}|r=r_2-0 = \sigma_{rr}|r=r_2+0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Із системи рівнянь (3.2) – (3.4) отримаємо рівняння:

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = \frac{\beta}{2\mu + \lambda} \frac{dt}{dr} \quad (3.7)$$

Розв'язавши рівняння (3.7) враховуючи (3.1), знаходимо:

$$u_r = \begin{cases} A_1 r + \frac{A_2}{r} + \frac{\beta_1 C_1}{2(2\mu_1 + \lambda_1)} r \ln r & \text{при } a \leq r \leq r_1, \\ A_3 r + \frac{A_4}{r} + \frac{\beta_2 C_3}{2(2\mu_2 + \lambda_2)} r \ln r & \text{при } r_1 < r \leq r_2, \\ A_5 r + \frac{A_6}{r} + \frac{\beta_3 C_5}{2(2\mu_3 + \lambda_3)} r \ln r & \text{при } r_2 < r \leq b, \end{cases} \quad (3.8)$$

де $\lambda_i = \frac{E_i \nu_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)}$; $\mu_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}$; $\beta_i = \alpha_i(3\lambda_i + 2\mu_i)$ ($i=1, 2, 3$); $A_1, A_2, \dots, A_6$ – сталі інтегрування.

На основі співвідношень (3.3) та (3.4) виведено формули для визначення напружень у трьох циліндричних координатах, враховуючи вплив температурного перепаду та навантажень від тиску p :

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= (2\mu + \lambda) \frac{du_r}{dr} + \lambda \frac{u_r}{r} - \beta t = -p, \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= \sigma_{rr} - 2\mu \left(\frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r} \right), \\ \sigma_{zz} &= \lambda \left(\frac{du_r}{dr} + \frac{u_r}{r} \right) - \beta t. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Сталі інтегрування A_1 – A_6 визначаємо виходячи з умов (3.5) та (3.6), що зводяться до наступної матричної рівності:

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(\mu_1 + \lambda_1) & -\frac{2\mu_1}{a^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_1 & \frac{1}{r_1} & -r_1 & -\frac{1}{r_1} & 0 & 0 \\ 2(\mu_1 + \lambda_1) & -\frac{2\mu_1}{r_1^2} & -2(\mu_2 + \lambda_2) & \frac{2\mu_2}{r_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_2 & \frac{1}{r_2} & -r_2 & -\frac{1}{r_2} \\ 0 & 0 & 2(\mu_2 + \lambda_2) & -\frac{2\mu_2}{r_2^2} & -2(\mu_3 + \lambda_3) & \frac{2\mu_3}{r_2^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(\mu_3 + \lambda_3) & -\frac{2\mu_3}{b^2} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \beta_1 \left(\frac{\mu_1 C_1}{2\mu_1 + \lambda_1} \ln a + C_2 - \frac{C_1}{2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\beta_2 C_3}{2\mu_2 + \lambda_2} - \frac{\beta_1 C_1}{2\mu_1 + \lambda_1} \right) r_1 \ln r_1 \\ \beta_1 \left(\frac{\mu_1 C_1}{2\mu_1 + \lambda_1} \ln r_1 + C_2 - \frac{C_1}{2} \right) - \beta_2 \left(\frac{\mu_2 C_3}{2\mu_2 + \lambda_2} \ln r_1 + C_4 - \frac{C_3}{2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\beta_3 C_5}{2\mu_3 + \lambda_3} - \frac{\beta_2 C_3}{2\mu_2 + \lambda_2} \right) r_2 \ln r_2 \\ \beta_2 \left(\frac{\mu_2 C_3}{2\mu_2 + \lambda_2} \ln r_2 + C_4 - \frac{C_3}{2} \right) - \beta_3 \left(\frac{\mu_3 C_5}{2\mu_3 + \lambda_3} \ln r_2 + C_6 - \frac{C_5}{2} \right) \\ \beta_3 \left(\frac{\mu_3 C_5}{2\mu_3 + \lambda_3} \ln b + C_6 - \frac{C_5}{2} \right) - p \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Наступним етапом після удосконалення математичної моделі є наведення результатів аналізу НДС підсиленої залізобетонної труби, враховуючи сумісний вплив температурного перепаду та статичного навантаження.

3.3.3. Результати розрахунку напружено-деформованого стану підсиленої труби за математичною моделлю

Результати обчислення переміщень, що виникають у напрямку радіальної координати r за умови перепаду температури між внутрішньою та зовнішньою

поверхнями тришарової труби на 10 °С та дії тиску величиною 19,4 кПа, наведені на рис. 3.19.

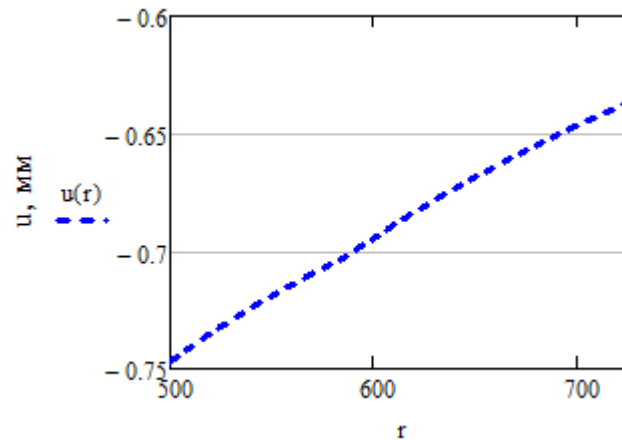


Рис. 3.19. Розподіл переміщень точок тришарової труби

Із рис. 3.19 видно, що максимальні переміщення спостерігаються у металевій трубі та досягають 0,75 мм. На зовнішній поверхні пошкодженої залізобетонної труби переміщення становлять 0,64 мм, а у ремонтній суміші – 0,69 мм. На межі між ремонтної суміші та існуючою дефектною залізобетонною трубою зафіксовано незначний перепад переміщень.

Оцінювання напруженого стану тришарової труби при сумісній дії температурного впливу та тиску від насипу земляного полотна наведена на рис. 3.20–3.22. Зокрема, на рис. 3.20 показано розподіл радіальних напружень σ_{rr} , на рис. 3.21 – осьових напружень σ_{zz} , а на рис. 3.22 – кільцевих напружень $\sigma_{\varphi\varphi}$.

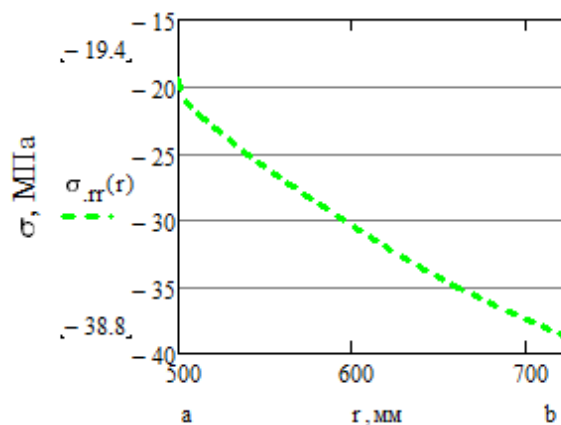


Рис. 3.20. Графік розподілу радіальних напружень σ_{rr}

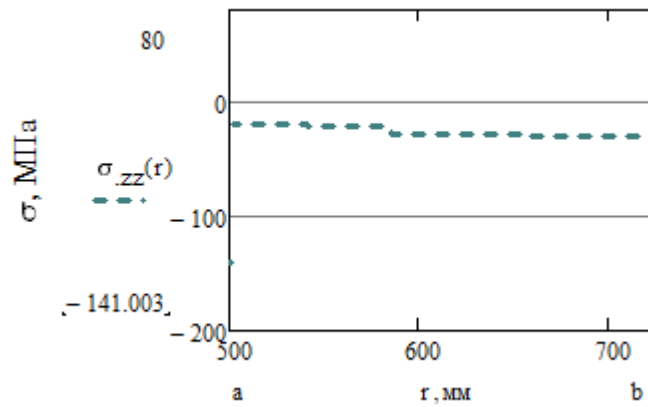


Рис. 3.21. Графік розподілу осьових напружень σ_{zz}

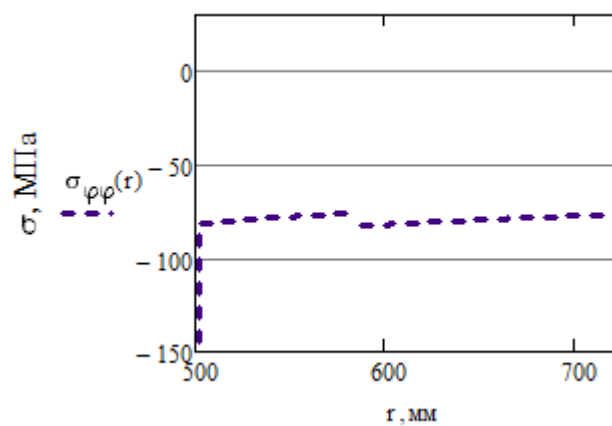


Рис. 3.22. Графік розподілу кільцевих напружень $\sigma_{\phi\phi}$

Аналіз результатів розрахунку напружень у тришаровій конструкції (рис. 3.20–3.22) свідчить про наявність стрибка напружень у місцях контакту матеріалів «метал-ремонтна суміш-бетон». Максимальна величина перепаду напружень спостерігаються при розрахунку кільцевих напружень, а їх значення становить 73 МПа. У той же час, різниця між радіальними та осьовими напруженнями є менш значною й не перевищує 1 МПа.

Максимальні значення напружень на зовнішній поверхні залізобетонної труби становлять: для радіальних напружень σ_{rr} – 37,4 МПа, для осьових σ_{zz} – 30,24 МПа, а для кільцевих $\sigma_{\phi\phi}$ – 77,34 МПа. В той час для металевої труби радіальні напруження досягають 20,92 МПа, осьові – 141 МПа, а кільцеві – 151 МПа.

Висновки до розділу 3

На основі проведеного теоретичного оцінювання напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб із застосуванням методу скінченних елементів і удосконаленої математичної можна сформулювати такі висновки:

1. У результаті скінченно-елементного аналізу НДС залізобетонних труб встановлено, що при навантаженні 15 кН максимальні деформації у залізобетонній трубі без підсилення досягають 4,61 мм. Застосування методу гільзування спричиняє зростання цього показника до 7,54 мм, а використання додаткового арматурного каркасу зумовлює деформації на рівні 7,40 мм.

2. Теоретичне моделювання залізобетонних труб у програмному середовищі FEMAP with NX Nastran дозволяє детально вивчити напруження та деформації, що виникають в конструкції при різних величинах навантажень.

3. Удосконалено математичну модель оцінювання напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб при дії статичних навантажень та впливу температур навколишнього середовища. Це дозволяє проводити інженерне оцінювання ефективності вибору матеріалів для ремонту дефектних труб та проводити аналіз напружено-деформованого стану труб при дії статичних навантажень насипу та перепаду температури середовища.

4. Встановлено, що величина переміщень у тришаровій підсиленій трубі, що виникає при сумісній дії температури і статичних навантажень склала 0,64 мм та 0,75 мм у металевій трубі. При цьому максимальні радіальні напруження σ_{rr} відповідно склали 37,4 МПа у дефектній трубі та 20,92 МПа у металевій трубі. Максимальні осьові напруження σ_{zz} становлять 30,24 МПа та 141 МПа відповідно, а максимальні кільцеві напруження $\sigma_{\varphi\varphi}$ становлять 77,34 МПа та 151 МПа.

На межі конструкційних матеріалів труби виникає стрибок напружень. Максимальна величина перепаду кільцевих напружень між металевою оболонкою та ремонтною сумішшю склала 73 МПа. Слід зазначити, що перепад радіальних та осьових напружень між конструкційними матеріалами є незначним і складає до 1 МПа.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТРУБ

4.1. Загальні положення експериментальних досліджень

Метою цього розділу є проведення експериментальних випробувань залізобетонних труб з метою визначення їх деформативності під дією силових навантажень. Експериментальні дослідження включають вивчення як труб без підсилення, так і труб, підсилених різними методами, які були запропоновані у розділі 2 (гільзування, додавання арматурного каркасу та ін'єктування). Такий підхід дозволяє оцінити ефективність різних технологій підсилення та відновлення залізобетонних конструкцій, а також порівняти їх вплив на несучу здатність і загальний стан труб.

Розроблено програму досліджень (табл. 4.1) та проведено натурні випробування зразків на гідравлічному випробувальному пресі в лабораторних умовах з метою моделювання реальних навантажень, які можуть діяти на труби під час експлуатації. Такі дослідження дозволяють отримати точні дані про деформації та характер руйнування, що виникають в трубах під впливом навантажень, та зробити висновки щодо оптимальних методів підсилення, виконавши їх порівняння.

Дана експериментальна частина є важливою складовою дослідження, оскільки надає можливість перевірити ефективність застосованих методів на практиці, що є основою для подальшого вдосконалення технологій підсилення залізобетонних труб із зниженими міцнісними характеристиками.

Зразки для дослідження поділили на чотири серії: Серія I – залізобетонні труби без підсилення; Серія II – пошкоджені залізобетонні труби підсилені методом гільзування; Серія III – пошкоджені залізобетонні труби, підсилені методом гільзування з використанням просторового арматурного каркасу; Серія IV – пошкоджені гільзовані залізобетонні труби, відновлені методом ін'єктування. У кожній із серій передбачено випробування 3 зразків. Загальна кількість випробуваних зразків залізобетонних труб – 12. Кожен зразок отримав індивідуальне маркування. Для прикладу ТЗБ–1.1, залізобетонна труба 1-ї серії; 1 зразок і так далі.

Серії, маркування, опис та завдання експериментальних досліджень

Серія, № п/п	Марка зразків	Опис	Завдання дослідження
I	ТЗБ–1.1	Випробування еталонних зразків залізобетонних труб без підсилення	Визначити максимальні деформації у момент зародження тріщин та момент руйнування; довести зразки до руйнування для подальшого відновлення методом гільзування, гільзування з використання просторового арматурного каркасу, ін'єкційним методом
	ТЗБ–1.2		
	ТЗБ–1.3		
II	ТЗБ–2.1	Випробування пошкоджених залізобетонних труб, підсилених методом гільзування	Визначити максимальні деформації у момент зародження тріщин та момент руйнування; довести зразки до руйнування для подальшого відновлення ін'єкційним методом
	ТЗБ–2.2		
	ТЗБ–2.3		
III	ТЗБ–3.1	Випробування пошкоджених залізобетонних труб, підсилених методом гільзування з використанням просторового арматурного каркасу	Визначити максимальні деформації у момент зародження тріщин та момент руйнування; отримати залежності між прикладеним навантаженням та деформаціями труб; отримати залежності між методами підсилення та їх впливом на деформативність труб
	ТЗБ–3.2		
	ТЗБ–3.3		
IV	ТЗБ–4.1	Випробування пошкоджених залізобетонних труб, відновлених методом ін'єктування	
	ТЗБ–4.2		
	ТЗБ–4.3		

Експериментальні дослідження проведено за методикою описаною в ДСТУ Б В.2.5-46:2010 [43].

Випробовування дослідних зразків залізобетонних труб проводили у приміщенні науково-дослідної лабораторії НДЛ-23 кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка».

Кліматичні умови у лабораторії відповідали вимогам [109]. Температура повітря була близько 20 °С, а відносна вологість в межах 40...70 %.

4.2. Об'єкт та методика досліджень

4.2.1. Опис зразків для випробувань

Геометричні параметри та матеріали залізобетонних труб прийнято відповідно до положень розділу 2 (див. п. 2.1), з урахуванням технічних характеристик випробувального устаткування та його конструктивних особливостей. Для проведення експериментальних випробувань заздалегідь замовлено заводські зразки залізобетонних труб.

Виготовлення труб проведено з дотриманням вимог ДСТУ Б В.2.5-63:2012 [41] щодо класу бетону та армування. Труби виготовлені з важкого бетону класу міцності на стиск С25/30, з маркою за морозостійкістю F100 та маркою за водонепроникністю W6 відповідно до ДСТУ 9208:2022 [141].

4.2.2. Розробка методології експериментальних випробувань

Методологія експериментальних випробувань розроблена з метою визначення напружено-деформованого стану залізобетонних труб під дією силових навантажень [167]. Для цього створено комплексну процедуру випробувань, що включає підготовку зразків, установку системи вимірювання деформацій, а також проведення випробувань у лабораторних умовах.

Вибір зразків для випробувань

Для експерименту обрано чотири типи зразків. Вибір цих зразків обумовлений необхідністю оцінити ефективність підсилення різними методами та здійснити їх порівняння.

Загальні вигляди дослідних зразків залізобетонних труб наведено на рис. 4.1– 4.4.



Рис. 4.1. Загальний вигляд дослідних зразків залізобетонної труби серії I



Рис. 4.2. Загальний вигляд дослідних зразків пошкодженої залізобетонної труби підсиленої гільзуванням серії II



Рис. 4.3. Загальний вигляд дослідних зразків пошкодженої залізобетонної труби підсиленої гільзуванням із використанням арматурного каркасу серії III



Рис. 4.4. Загальний вигляд дослідних зразків пошкодженої залізобетонної труби, несучу здатність якої відновлено методом ін'єктування епоксидного розчину серії IV

Опис використаного обладнання

Випробування дослідних зразків проводили в лабораторних умовах із застосуванням гідравлічного преса П-250 (рис. 4.5, а), який забезпечує контрольоване прикладання навантаження до випробуваних залізобетонних труб. Технічні характеристики преса П-250 наведено в табл. 4.2, де детально наведено його основні параметри, що впливають на точність і надійність проведених випробувань.

Таблиця 4.2

Характеристики гідравлічного преса П-250

№ п/п	Найменування	Характеристики
1	Найбільше навантаження, кН	2500
2	Тип приводу та силовимірювача	Електрогідравлічний, торсійний
3	Відображення даних	Аналоговий циферблат
4	Діапазон вимірів основний/додатковий	250-1250/500-2500
5	Похибка при навантаженні, %	±2
6	Робочий хід гідравлічного поршня, мм	50
7	Висота робочого простору, включно з ходом гідравлічного поршня, мм	1000
8	Максимальна швидкість переміщення гідравлічного поршня, мм/хв	20
9	Відстань між колонами, мм	530
10	Розмір плит стиску, мм	500x500
11	Габаритні розміри (довжина – ширина – висота), мм	2500x950x2800
12	Маса випробувальної машини, кг	3600
13	Потужність, кВт	3,5
14	Електроживлення, В/Гц	~380/50

Прес забезпечує рівномірне прикладання навантаження до зразка, що дозволило отримати надійні й точні дані про деформації в трубах під впливом зовнішніх сил.

Встановлення зразків на гідравлічний прес П-250 відбувалося за допомогою кран-балки з електричною лебідкою (рис. 4.5, б).



а



б

Рис. 4.5. Використане обладнання: *а* – гідравлічний випробувальний прес П-250; *б* – кран-балка з електричною лебідкою

Для вимірювання деформацій встановлено систему електронних цифрових датчиків, яка включала:

- індикатори деформацій з магнітною базою для запису переміщень труб під дією навантаження (рис. 4.6);
- система збору даних, що реєструвала результати випробувань у режимі реального часу.

У процесі експерименту для вимірювання деформацій використовували електронні цифрові індикатори з діапазоном вимірювання 0-25,4 мм та ціною поділки 0,01 мм.



Рис. 4.6. Електронний цифровий індикатор з магнітною базою

Система збору даних являє собою спеціально запрограмований мікроконтролер (аналогово-цифровий перетворювач) на який надходять дані про деформації з електронних цифрових індикаторів та передаються на програмне забезпечення комп'ютера. Програмне забезпечення розроблене на апаратній обчислювальній платформі Arduino.

Схема системи збору даних при дослідженні деформованого стану залізобетонної труби наведена на рис. 4.7.

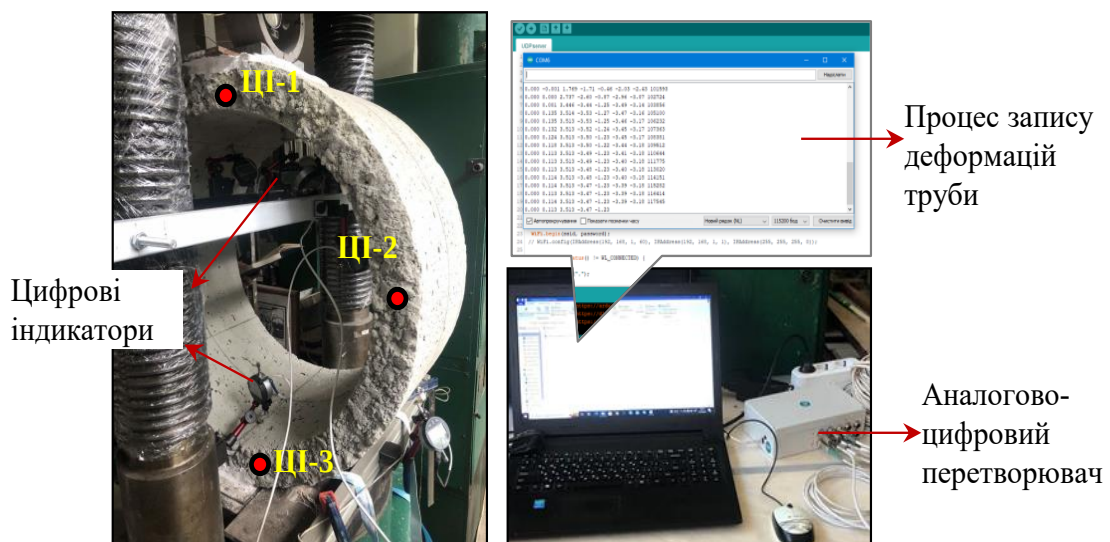


Рис. 4.7. Схема системи збору даних при дослідженні деформованого стану залізобетонної труби

Контроль навантаження здійснювали за допомогою багатооборотного кільцевого динамометра з індикатором годинникового типу, який встановлювали на залізобетонне кільце під плитою стиску (рис. 4.8, *а*).

З метою забезпечення безпечних умов проведення експерименту та збереження цілісності обладнання використано послаблені стяжні ремені з храповим механізмом.

Для спостереження за розвитком тріщин, які виникали у процесі випробувань залізобетонних труб під дією навантажень, використано відліковий мікроскоп МПБ-2 (рис. 4.8, *б*) з ціною поділки шкали 0,05 мм.



а



б

Рис. 4.8. Використане обладнання: *а* – кільцевий динамометр з індикатором годинникового типу; *б* – відліковий мікроскоп МПБ-2

Схема дослідної установки, яка використовувалася для проведення експериментальних випробувань, наведена на рис. 4.9. Вона відображає конструкцію випробувального стенда, розташування дослідного зразка, а також основні елементи, що забезпечують прикладання та контроль навантаження.

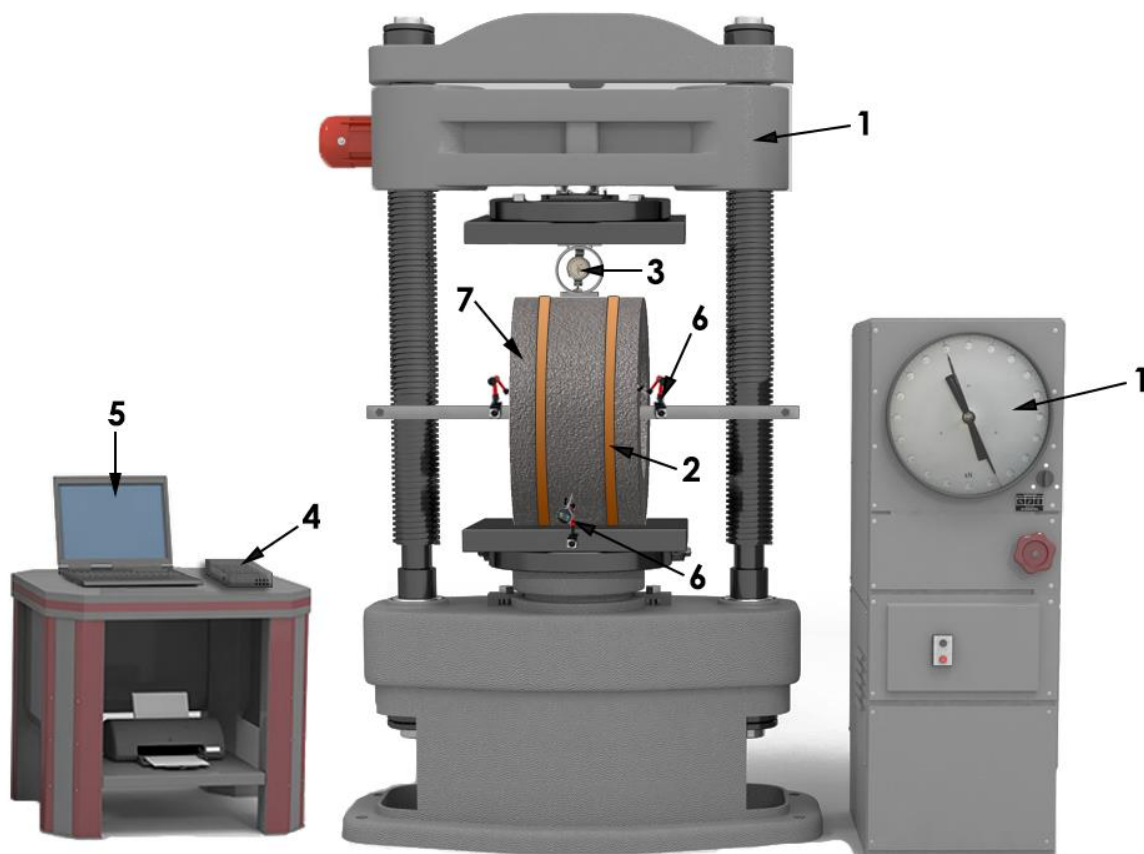


Рис. 4.9. Схема дослідної установки для проведення експериментальних випробувань: 1 – прес випробувальний гідравлічний П-250; 2 – стяжні ремені; 3 – кільцевий динамометр; 4 – аналогово-цифровий перетворювач; 5 – комп'ютер з програмним забезпеченням; 6 – електронні цифрові індикатори; 7 – труба

Схема розташування індикаторів

Для забезпечення точності вимірювань індикатори встановлені в місцях виникнення максимальних деформацій у кількох точках вздовж довжини та периметру труб. Місця виникнення найбільших деформацій прийнято відповідно до схеми статичного розрахунку круглих труб та епюри розподілу згинальних моментів під дією силових навантажень на труби круглого перерізу, що були наведені у розділі 1 (див. п. 1.3.), з яких зроблено висновок, що максимальні значення згинальних моментів виникають у верхній частині труби (в зоні вертикального діаметра) та на її бокових сторонах. Враховуючи ці особливості розподілу згинальних моментів, прийнято рішення розмістити індикатори в точках з найбільшими значеннями згинальних моментів.

У процесі експерименту прийнято, що деформації розподіляються симетрично відносно вертикальної осі труби, тому при проведенні частини випробувань індикатори розміщувалися лише з однієї сторони труби відносно вертикальної осі.

Схему розташування електронних цифрових індикаторів наведено на рис 4.10.

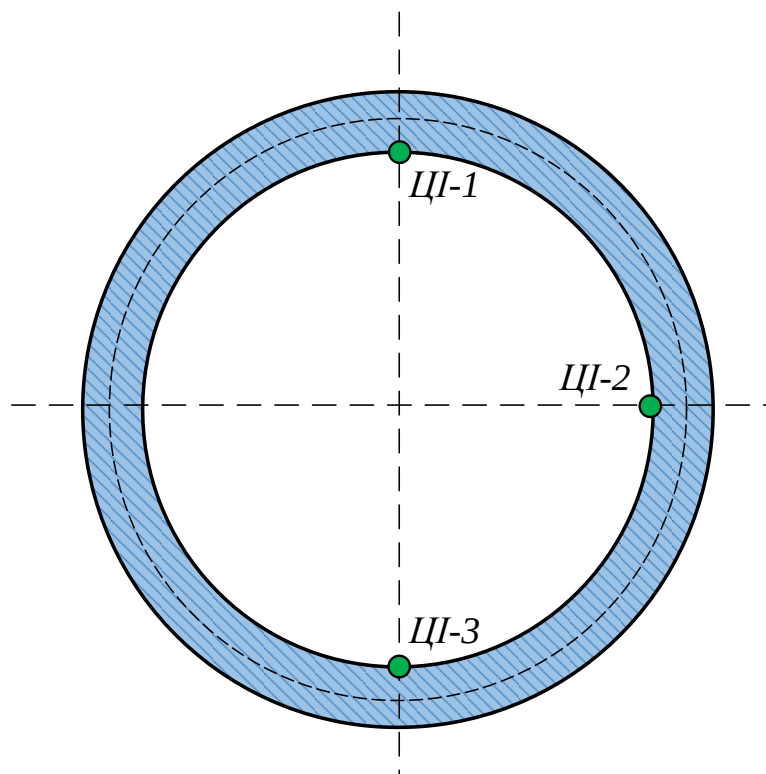


Рис. 4.10. Схема розташування індикаторів на дослідних зразках труб

Після прикладання навантаження гідравлічним пресом П-250 дані про величину деформацій залізобетонних труб з електронних цифрових індикаторів передаються на аналогово-цифровий перетворювач, а з нього на комп'ютер, де фіксуються за допомогою програмного забезпечення та зберігалися у пам'яті комп'ютера.

Матеріал для заповнення міжтрубного простору

Для заповнення міжтрубного простору обрано ремонтну суху будівельну суміш BONUS Plus PC-3, яка призначена для відновлення та усунення дефектів у бетонних і цементно-піщаних основах. Даний матеріал застосовується для ремонту тріщин, раковин, виїмок та інших локальних пошкоджень, а також для вирівнювання

поверхонь монолітних стяжок, безшовних підлог із підігрівом, сходових маршів, рамп та асфальтобетонних основ.

Суміш BONUS Plus PC-3 має широкий діапазон товщини шару нанесення (від 10 мм до 100 мм), що забезпечує можливість її ефективного використання для заповнення простору між пошкодженою та новою трубою. Марка суміші за морозостійкістю F 300 та водонепроникності W 12. До складу матеріалу входять цемент як основне в'язуче, мінеральні наповнювачі та полімерні модифікуючі добавки.

Технічні характеристики, заявлені виробником, наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Технічні параметри суміші BONUS Plus PC-3

№	Показник	Нормативне значення
1	Зовнішній вигляд	Порошок сірого кольору
2	Витрата води для приготування, л/кг	0,22
3	Максимальна крупність заповнювача, мм	2,5
4	Розтічність суміші, мм (по ДСТУ Б.В. 2.7-126:2011)	Понад 200
5	Час збереження рухливості при температурі 20 °С, хв.	45
6	Міцність на розтяг (28 діб), МПа	>6,5
7	Міцність на стиск (28 діб), МПа	>35,0
8	Адгезія до бетонної поверхні, МПа	>2,0
9	Водонепроникність, МПа	1,0
10	Морозостійкість, F	300
11	Усадка, мм	Не допускається
12	Модуль пружності на стиск, МПа	32000
13	Товщина шару застосування, мм	10–100
14	Температура застосування суміші, °С	Від +5 до +30
15	Температура експлуатації затверділої суміші, °С	Від -30 до +60

Приготування суміші здійснюється шляхом змішування сухого компоненту з чистою водою відповідно до необхідної пропорції (табл. 4.3). Процес змішування проводиться механічним способом за допомогою низькообертового міксера з насадкою або будівельної мішалки до отримання однорідної, пластичної маси без грудок.

Кількість води допускається коригувати в межах, визначених виробником, залежно від умов нанесення та вимог до консистенції суміші. Після первинного змішування суміш витримують протягом 3 хвилин для завершення процесів гідратації, після чого повторно перемішують до рівномірної структури.

Приготовлена суміш необхідно використати протягом 15 хвилин з моменту замішування. Всі інструменти та тара, які використовують у процесі приготування, повинні бути чистими, щоб запобігти небажаним домішкам, які можуть вплинути на властивості матеріалу.

Перед нанесенням суміші основу необхідно очистити від забруднень, що знижують адгезію, зокрема пилу, маслянистих плям і залишків будівельних матеріалів. Фрагменти відшарувань, у тому числі покриті цементним «молочком», слід видалити. Оброблену ґрунтовкою поверхню витримують не менше 4 годин для покращення зчеплення.

Під час ремонту дефекти заповнюють сумішшю і вирівнюють шпателем. Для горизонтальних поверхонь її готують більш рідкої консистенції, що забезпечує саморозтікання. Рекомендована товщина одного шару – від 10 мм до 100 мм.

Підготовка зруйнованих зразків до випробувань

Підсилення зруйнованих залізобетонних труб методом гільзування.

Серія II. Для підсилення зруйнованих зразків залізобетонних труб застосовано метод гільзування, описаний у розділі 2 (див. п. 2.1). Цей метод передбачав встановлення нової внутрішньої труби всередину пошкодженої зовнішньої. Процес підсилення відбувався в декілька етапів:

1. Очищення внутрішньої поверхні пошкодженої труби. Перед початком гільзування внутрішню поверхню зруйнованих труб очищали від уламків, бруду та

залишків старого бетону за допомогою металевої щітки. Потім на внутрішню очищену поверхню щіткою наносили глибокопроникний ґрунтувальний розчин для покращення адгезії між бетонною поверхнею та ремонтною сумішшю, що забезпечувало якісне зчеплення між новими та старими шарами матеріалу (рис. 4.11).



Рис. 4.11. Ґрунтування внутрішньої поверхні пошкодженої залізобетонної труби

2. Виготовлення та встановлення металевої труби. Діаметр і матеріал металевих труб прийнято відповідно до параметрів наведених у розділі 2 (див. п. 2.1) та підібрано таким чином, щоб створити оптимальний зазор між ними та зруйнованими залізобетонними трубами для подальшого заповнення ремонтною сумішшю. Металева труба також забезпечує додаткову міцність і жорсткість конструкції. Виготовлено металеві труби з листової сталі класу Ст3 шляхом згинання її в трубу та з'єднання поздовжнього шва за допомогою електрозварювальної установки (рис. 4.12, а). Після зварювання отримані металеві труби за допомогою кутової шліфмашини обрізано до необхідної довжини, яку обрано виходячи з габаритів випробувального устаткування (рис. 4.12, б). Отримані металеві труби необхідних розмірів розмістили всередину зруйнованих залізобетонних зразків.



a



б

Рис. 4.12. Зварні металеві труби: *a* – виготовлені зварні металеві труби;
б – обрізання труб до необхідного розміру

3. Центрування та фіксація. Металеві труби вирівнювали та фіксували всередині пошкоджених залізобетонних зразків дерев'яними клинами для забезпечення рівномірного заповнення простору ремонтною сумішшю (рис. 4.13).



Рис. 4.13. Відцентровані та розклинені металеві труби всередині залізобетонних зразків

4. Заповнення простору ремонтною сумішшю. Після фіксації металевих труб ремонтну суміш для заповнення конструктивного зазору засипали в ємність, додавали воду та перемішували до отримання однорідної консистенції. Після 5 хв.

суміш знову ретельно перемішували (рис. 4.14, *а*). Отриманий матеріал за допомогою шпателя вкладали в конструктивний зазор між трубами до повного його заповнення (рис. 4.14, *б*). Це створювало міцне зчеплення між поверхнями, підсилюючи конструкцію та відновлюючи її цілісність.



Рис. 4.14. Заповнення простору між трубами ремонтною сумішшю:
а – замішування сухої будівельної суміші; *б* – вкладання суміші в конструктивний зазор

Ущільнення суміші виконували методом штикування з використанням металевого стержня. Стержень занурювали в суміш та частими поштовховими рухами з невеликою амплітудою ущільнювали матеріал, поступово його «проколюючи». Такий спосіб сприяв ефективному видаленню повітряних порожнин, що запобігало утворенню пустот та забезпечувало рівномірний розподіл матеріалу по всьому об'єму заповнення. Після завершення ущільнення стержень повільно виймали з матеріалу, надаючи йому вертикальну та горизонтальну вібрацію, що додатково сприяло осіданню суміші та рівномірному зчепленню із прилеглими поверхнями конструкції.

5. **Витримка для затвердіння.** Після заповнення міжтрубного простору, зразки витримували в приміщенні лабораторії до набору ремонтною сумішшю проєктної міцності (> 28 діб) для забезпечення надійного зчеплення та підвищеної несучої здатності конструкції (рис. 4.15).



Рис. 4.15. Зразки із заповненим міжтрубним зазором ремонтною сумішшю

Підсилення зруйнованих залізобетонних труб методом гільзування із додаванням арматурного каркасу. Серія III. Підсилення зразків залізобетонних труб здійснювали удосконаленим методом гільзування із додаванням арматурного каркасу, запропонованим у розділі 2 (див. п. 2.2). Цей метод передбачає додаткове армування кільцевого простору між існуючою та новою трубою, що передбачає влаштування додаткового просторового арматурного каркасу.

1. **Очищення внутрішньої поверхні зруйнованих труб.** Перед встановленням арматурного каркасу внутрішню поверхню зруйнованих залізобетонних зразків очищали від уламків, пилу та залишків бетону. Після очищення щіткою наносили глибокопроникний ґрунтувальний розчин.

2. **Виготовлення арматурних каркасів.** Армування для відновлення зразка відповідало армуванню типових залізобетонних безнапірних труб згідно ДСТУ Б В.2.5-63:2012 [41]. Каркаси виготовлено відповідно до геометричних параметрів, наведених у розділі 2 (див. п. 2.2), та склалися із чотирьох арматурних кілець

Ø6A240C з кроком 100 мм, які приварювали на вісім поздовжніх арматурних стержнів Ø6A240C.

Процес виготовлення арматурних каркасів здійснювали в кілька етапів: спочатку відрізали арматурні стержні необхідної довжини, після чого проводили їх попереднє згинання та фіксацію у відповідних місцях. Далі виконували зварювання елементів каркасу, контролюючи геометрію каркасу для забезпечення точності виготовлення та відповідності необхідним параметрам.

Для виготовлення одного зразка арматурного каркасу витрата арматури класу Ø6A240C склала 10,5 м.

Всередину виготовлених арматурних каркасів (рис. 4.16, *а*) в подальшому буде розміщено металеві труби (рис. 4.16, *б*), які також будуть слугувати опалубкою для заповнення сумішшю.



Рис. 4.16. Підсилення арматурним каркасом: *а* – арматурний каркас для зміцнення залізобетонної труби; *б* – розміщена всередині каркасу металева труба

3. Встановлення арматурних каркасів та металевих труб. Після розміщення арматурних каркасів (рис. 4.17, *а*) нові зварні металеві труби встановлювали всередину арматурних каркасів (рис. 4.17, *б*), залишаючи необхідний зазор для заповнення ремонтною сумішшю. Металеві труби підсилювали жорсткість конструкції та створювали основу для відновлення, виступаючи в ролі опалубки.



Рис. 4.17. Підсилення арматурним каркасом: *а* – розміщений арматурний каркас;
б – металева труба встановлена разом із арматурним каркасом

4. Центрування та фіксація. Після встановлення металевих труб їх разом із арматурними каркасами ретельно вирівнювали, щоб забезпечити рівномірний розподіл навантаження у майбутній конструкції. Для фіксації застосовували дерев'яні клини, які встановлювали між арматурним каркасом і стінками зруйнованої труби, а також між металевою трубою та каркасом. Це запобігало можливим зсувам елементів під час заливки ремонтної суміші, а також дозволяло зберігати необхідний зазор між елементами конструкції.

5. Заповнення простору ремонтною сумішшю. Після фіксації всіх елементів конструкції розпочинали підготовку матеріалу для заповнення. Спочатку ретельно приготували ремонтну суміш, перемішуючи до отримання однорідної маси (рис. 4.18, *а*). Готовий матеріал подавали у простір між зруйнованими залізобетонними зразками та металевими трубами із встановленими арматурними каркасами за допомогою шпателя (рис. 4.18, *б*). Заповнення здійснювали поетапно, рівномірно розподіляючи суміш уздовж конструкції. Для забезпечення щільного прилягання суміші та уникнення утворення пустот виконували її ущільнення методом штикування, використовуючи металевий стержень.



Рис. 4.18. Заповнення простору між трубами ремонтною сумішшю: *а* – замішування сухої будівельної суміші; *б* – заповнення міжтрубного простору сумішшю

6. **Витримка для затвердіння.** Зразки залишали для набору ремонтною сумішшю необхідної проєктної міцності (> 28 діб) для проведення експерименту (рис. 4.19).



Рис. 4.19. Підсилений арматурним каркасом зразок із заповненим ремонтною сумішшю простором

Підсилення зруйнованих залізобетонних труб методом ін'єктування епоксидної смоли. Серія IV. Для відновлення структурної цілісності зразків залізобетонних труб, які були попередньо підсилені методом гільзування, а потім доведені до руйнування під час дослідження їх деформативності, застосовано технологію ін'єктування, запропоновану у розділі 2 (див. п. 2.3).

Основні етапи підготовки зразків:

1. Підготовка поверхні тріщин. Зразки зруйнованих залізобетонних труб із підсиленням гільзуванням очищали від пилу, залишків бетону та сторонніх матеріалів на ділянках тріщин. Очищення здійснювали за допомогою стиснутого повітря та щіток для видалення дрібних фрагментів бетону. Це дозволяло забезпечити якісне зчеплення смоли з внутрішніми поверхнями тріщин і покращити ефективність підсилення.

2. Виконання отворів та встановлення пакерів. У чотирьох місцях із значними тріщинами в бетоні за допомогою дреля просвердлили отвори та встановлювали в них спеціальні ін'єкційні пакери (штуцери) для введення епоксидної смоли (рис. 4.20).



Рис. 4.20. Встановлення пакерів на поверхні тріщини: *а* – виконання отворів; *б* – нанесення епоксидної пасти на пакер; *в* – закріплення пакеру на поверхні тріщини

Обрано вид пакерів, що наклеюються на поверхню конструкції (рис. 4.21). Пакери фіксували епоксидною пастою по довжині тріщини на відстані, що дозволяла забезпечити рівномірне поширення смоли вглиб конструкції.

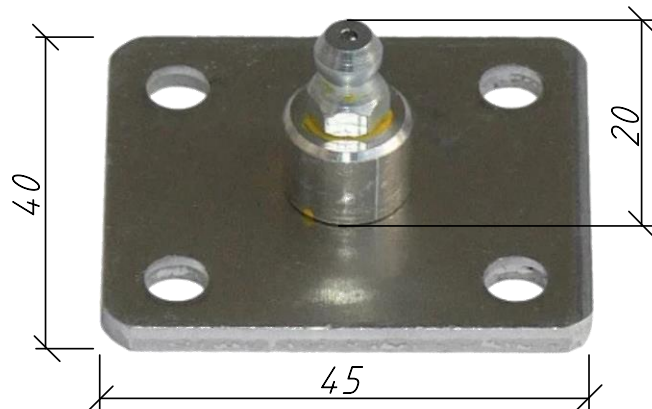


Рис. 4.21. Ін'єкційний пакер, що наклеюється

Фіксування пакерів виконували за допомогою епоксидної пасті VIMEROX MORTAR, що утримувало їх на місці під час ін'єктування. Схему встановлення пакерів вздовж чотирьох тріщин для усіх зразків Серії IV наведено на рис. 4.22.

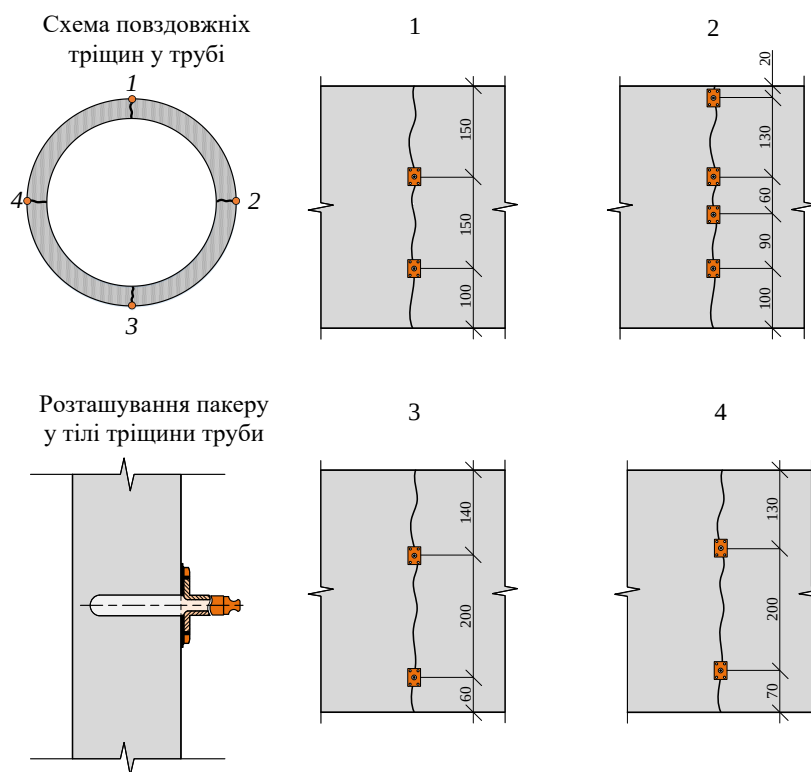


Рис. 4.22. Схема встановлення пакерів вздовж тріщин: 1, 2, 3, 4 – номери повздовжніх тріщин у зразках

3. **Герметизація поверхні зразків.** Щоб уникнути витікання епоксидної смоли, поверхні з видимими тріщинами герметизували епоксидною пастою VIMEPOX MORTAR шляхом її нанесення за допомогою шпателя на поверхню тріщин, що утримувало епоксидний розчин у межах тріщини та забезпечувало його рівномірне заповнення (рис. 4.23).



Рис. 4.23. Герметизація поверхні тріщин епоксидною пастою

4. **Ін'єктування епоксидної смоли.** Після набору епоксидною пастою необхідної міцності (24 год.) проводили ін'єктування тріщин. Для склеювання тріщин обрано двокомпонентну епоксидну смолу VIMEPOX INJECT, завдяки її здатності сприймати значні зусилля на стиск (до 53 Н/мм²) та хорошій адгезії до бетону (до 8 Н/мм²). Нагнітання матеріалу в тріщини проводили під тиском за допомогою пневматичного поршневого насосу Dittmann Injecta D6 (рис. 4.24).

Перед початком виконання ін'єктування епоксидним матеріалом під тиском, перевіряли герметичність тріщин. Для цього подавали стиснене повітря, а вже після цього подавали епоксидну суміш.



Рис. 4.24. Конструкція поршневого насосу Dittmann Injecta D6

Ін'єктування проводили від нижнього пакера 1 (рис. 4.25), при цьому інші пакери були відкритими для того, щоб запобігти запаковування повітря всередині пустот бетону. Після появи розчину в наступному пакері, за допомогою запірного клапана подачу розчину припиняли.



Рис. 4.25. Процес ін'єктування тріщин розчином

Запечатували пакер 1 і далі подавали розчин у наступний пакер 2 і так по черзі, виконували ін'єктування тріщин по колу труби. Процес контролювали, поступово додаючи смолу, поки вся тріщина не була повністю заповнена, а матеріал не почав виходити з протилежних пакерів, що свідчило про завершення заповнення.

5. Витримка для затвердіння смоли. Після заповнення тріщин смолою зразки залишали для затвердіння (>10 діб). Температура та вологість у лабораторії дозволяла забезпечити рівномірне і повне затвердіння матеріалу. Витримка була важливим етапом, оскільки повне затвердіння смоли сприяло міцному зчепленню з бетонними поверхнями тріщини та відновленню несучої здатності зразка.

На рис. 4.26 наведено зразки сумішей, що використовували для відновлення несучої здатності залізобетонних труб методом ін'єктування. Зокрема, зображено епоксидну пасту VIMEPOX MORTAR (рис. 4.26, а), яка застосовується для заповнення тріщин і локальних дефектів, а також епоксидну ін'єкційну смолу VIMEPOX INJECT (рис. 4.26, б), що забезпечує проникнення у мікротріщини та зчеплення матеріалу в глибоких порожнинах конструкції.



Рис. 4.26. Суміші для відновлення несучої здатності методом ін'єктування:

a – епоксидна паста VIMEPOX MORTAR; *б* – епоксидна ін'єкційна смола VIMEPOX INJECT

Технічні характеристики ін'єкційної смоли VIMEPOX INJECT наведено в табл. 4.4 [169].

Таблиця 4.4.

Технічні характеристики ін'єкційної смоли VIMEPOX INJECT

№ п/п	Характеристика	Значення
1	Співвідношення змішування (за масою)	4:1 (А:Б)
2	Густина суміші	1,05 кг/л
3	Температура застосування	вище +8 °С
4	Час застосування (20 °С, 1 л)	90 хв.
5	В'язкість, 23 °С (компоненти А+Б)	250 мПа·с
6	Міцність на стиск	53 Н/мм ²
7	Міцність на згин	41 Н/мм ²
8	Модуль пружності при згині: (DIN EN ISO 178)	1165 Н/мм ²
9	Міцність на розтяг	> 39 Н/мм ²
10	Модуль пружності при стисненні: (DIN EN ISO 604)	1450 Н/мм ²
11	Модуль пружності при розтягуванні: (DIN EN ISO 527)	1210 Н/мм ²
12	Міцність зв'язку з бетоном (DIN EN ISO 12636)	> 8 Н/мм ²

4.2.3. Опис методу випробувань

Методи визначення деформацій. Випробування проводили із застосуванням електронних індикаторів деформації на магнітній базі з роздільною здатністю 0,01 мм, розташованих уздовж зовнішньої та внутрішньої поверхонь зразків залізобетонних труб. Індикатори дозволяли безперервно фіксувати зміни в напружено-деформованому стані труб під час випробувань. Для контролю розподілу деформацій на різних ділянках труб були встановлені додаткові індикатори, що дало змогу відстежувати локальні особливості поведінки конструкції при навантаженні (рис. 4.27). Для ознайомлення зі схемою розташування індикаторів на поверхні зразків див. п. 4.2.2.

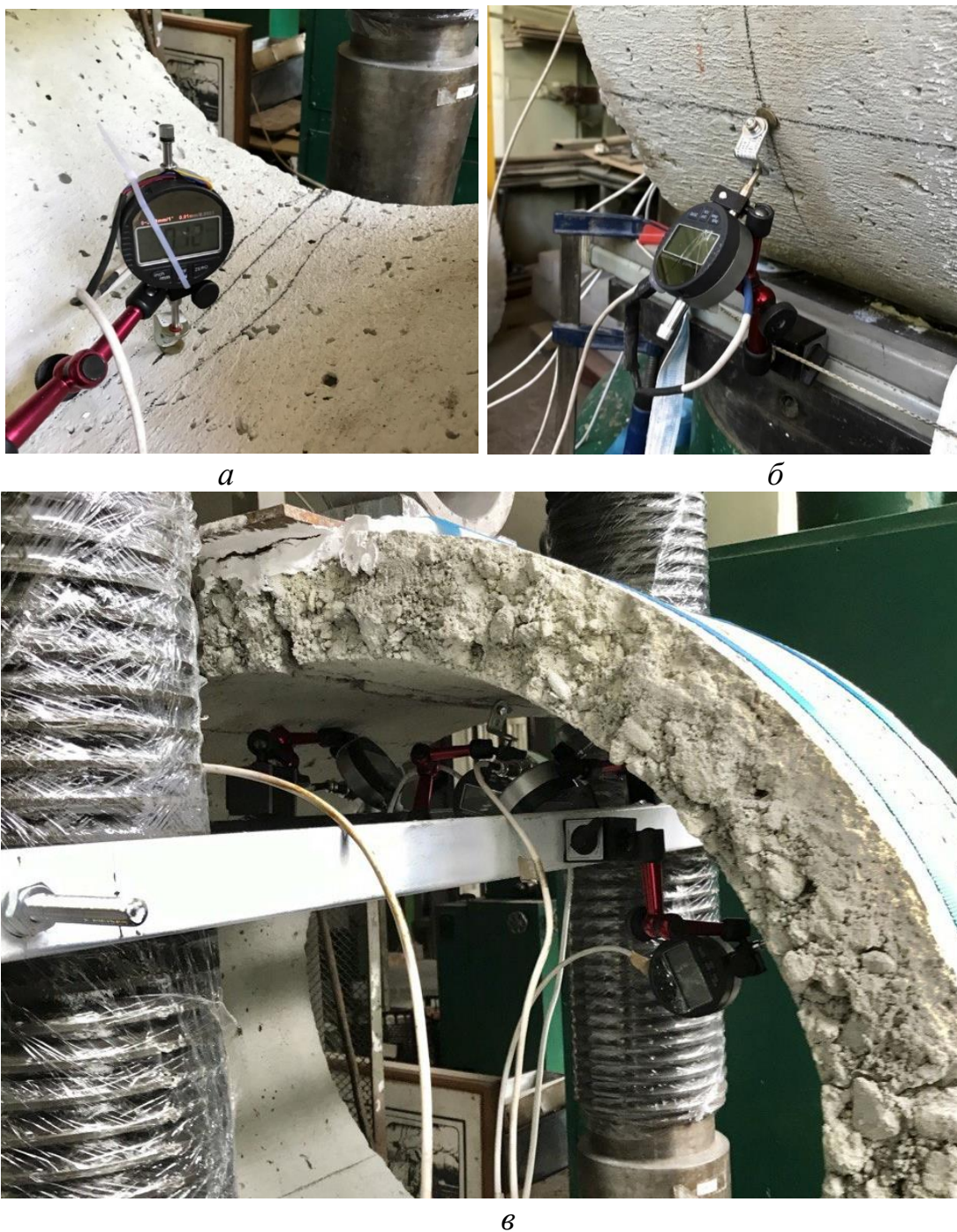


Рис. 4.27. Вимірювальні індикатори, що розташовані на поверхні випробувальних зразків: *а* – індикатор в нижчій частині зразка; *б* – індикатор на боковій частині зразка; *в* – індикатори на внутрішній верхній та бокових частинах зразка

При виконанні частини досліджень прийнято припущення, що деформації виникають симетрично, тому виміри проводили лише з однієї сторони труби. Для цього один датчик розташовували у верхній частині залізобетонної труби, один на боковій стороні та один у нижній частині труби.

Методика випробувань зразків під навантаженням. Дослідження проводилися виходячи з вимог [43] (див. п. 1.3), а саме шляхом прикладання зосередженого навантаження F в напрямку вертикального діаметра з використанням гідравлічного преса П-250, який забезпечував контрольоване поступове збільшення навантаження на зразки. З метою рівномірної передачі навантаження на зразки труб нижня частина дослідних зразків спиралась на жорстку основу преса через вирівнювальний розчин. На верхню частину вкладали вирівнювальний розчин та металеву пластину. Навантаження прикладалося до труб ступінчато, величиною 5 кН, щоб створити рівні умови випробувань для всіх типів зразків, включаючи невідсилені та відсилені труби. Поступове збільшення навантаження дозволяло відстежити зміну деформацій на різних етапах, а також визначити максимальні значення деформацій, при яких зразок втрачав несучу здатність. На кожному етапі навантаження його витримка становила 5 хв. Статичні випробування залізобетонних труб проводили до повного руйнування.

На рис. 4.28 наведено прийнятту схему випробування залізобетонних труб згідно з ДСТУ Б В.2.5-46:2010 [43].

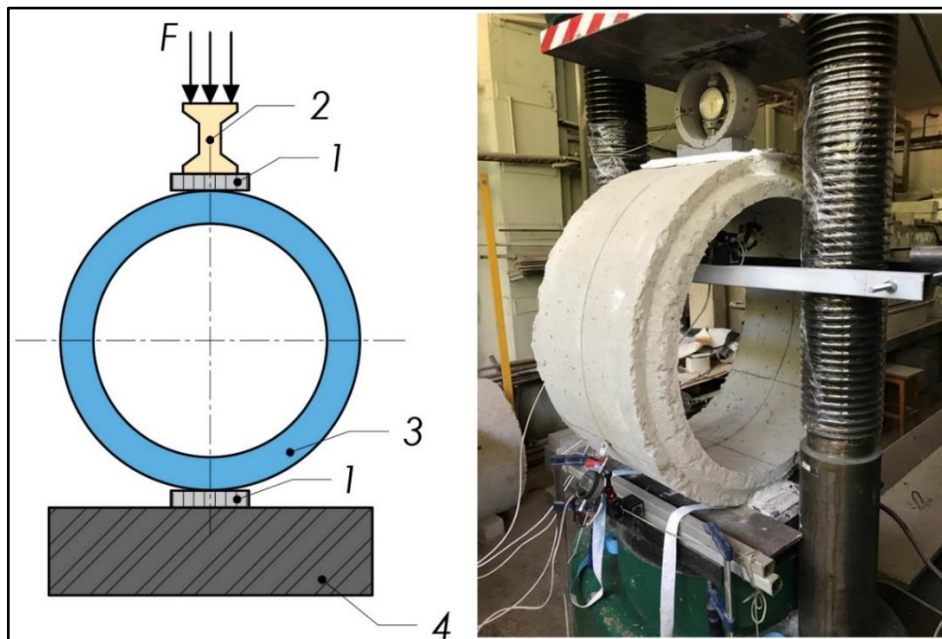


Рис. 4.28. Схема випробування залізобетонних труб згідно ДСТУ Б В.2.5-46:2010:

- 1 – вирівнювальний розчин; 2 – металева траверса; 3 – випробувальний зразок;
4 – нерухома основа

Метод реєстрації деформацій під час випробувань. Використовували спеціальну електронну систему реєстрації даних, що дозволяла фіксувати показники деформацій у реальному часі та зберігати їх для подальшого аналізу. Система реєстрації була синхронізована з гідравлічним пресом, що дозволяло зіставляти величини деформацій із відповідними значеннями навантажень. Це забезпечило точність даних, необхідних для вивчення взаємозв'язку між навантаженням та деформаційним станом зразків. За допомогою запрограмованого мікроконтролера результати деформацій записувалися та зберігалися у файлі комп'ютера із частотою запису 4 Гц.

Схема процесу реєстрації деформованого стану залізобетонної труби наведена на рис. 4.29.



Рис. 4.29. Експериментальна схема для реєстрації деформацій залізобетонної труби на гідравлічному випробувальному пресі П-250

Аналіз тріщиноутворення. Під час експериментів спостерігали за процесом виникнення та розвитку тріщин із використанням відлікового мікроскопу МПБ-2 з ціною поділки 0,05 мм. Для покращення візуального спостереження за появою та розвитком тріщин перед дослідженнями на бокові поверхні дослідних елементів наносили вапняний розчин. Утворення тріщин фіксували візуально та позначали графічно олівцем на обох бокових поверхнях зразків. Ширину розкриття тріщин фіксували в місцях їх максимального розкриття. Візуальні спостереження за станом поверхні зразків доповнювали даними з датчиків, які фіксували раптові зміни в деформаціях на стадіях, коли починалося руйнування.

4.3. Результати експериментальних досліджень

Випробування дослідних зразків залізобетонних труб проведено згідно з програмою досліджень (див. п. 4.1) за методикою описаною у п. 4.2.3 шляхом прикладання зосередженого навантаження у напрямку вертикального діаметра. Схема випробовування залізобетонних труб відповідала схемі випробовування безнапірних труб згідно стандарту [43]. Всього випробувано по 3 зразка для кожної серії (серія I – 3 зразки, серія II – 3 зразки, серія III – 3 зразки, серія IV – 3 зразки). Загальна кількість випробуваних зразків – 12. При виконанні експериментальних досліджень деформованого стану зразків усіх серій проведено випробовування до повного руйнування.

Критерієм оцінювання деформованого стану труб обрано момент зародження поверхневих тріщин у зразках та момент їх повного руйнування. Моментом зародження тріщин вважається момент появи та фіксації тріщини візуально або за допомогою відлікового мікроскопу МПБ-2.

Автори у посібнику [170] зазначають, що руйнування може бути частковим або повним. При частковому руйнуванні у тілі виникають пошкодження матеріалу у вигляді окремих тріщин або розподілених дефектів матеріалу, що виявляються у зміні в бік погіршення механічних властивостей матеріалу. При повному руйнуванні відбувається поділ тіла на частини. У процесі проведення експериментальних випробувань прийнято критерій повного руйнування (поділу дослідного зразка на частини), як момент утворення тріщини на внутрішній та зовнішній стороні стінки труби.

4.3.1. Серія I. Залізобетонна труба без підсилення – еталон

Згідно розробленої програми досліджень отримано результати випробувань дослідних зразків серії I: ТЗБ–1.1, ТЗБ–1.2, ТЗБ–1.3, які слугують вихідними даними для порівняння ефективності підсилення пропонованими (див. п. 2.1–2.3) та виконаними (див. п. 4.2.2) методами зразків серій II, III та VI.

Зображення дослідних зразків після руйнування наведено на рис. 4.30. В усіх зразках серії I утворення тріщин 1, 2, 3 та 4 відбулося у зонах максимальних деформацій, що відповідає очікуванім ділянкам концентрації напружень, визначеним за епюрою розподілу згинальних моментів круглих труб (див. п. 1.3) та вибраним для встановлення цифрових індикаторів. Характер руйнування підтверджує прогнозовану поведінку конструкції під навантаженням, що дозволяє використовувати ці результати для подальшого порівняння ефективності підсилення.

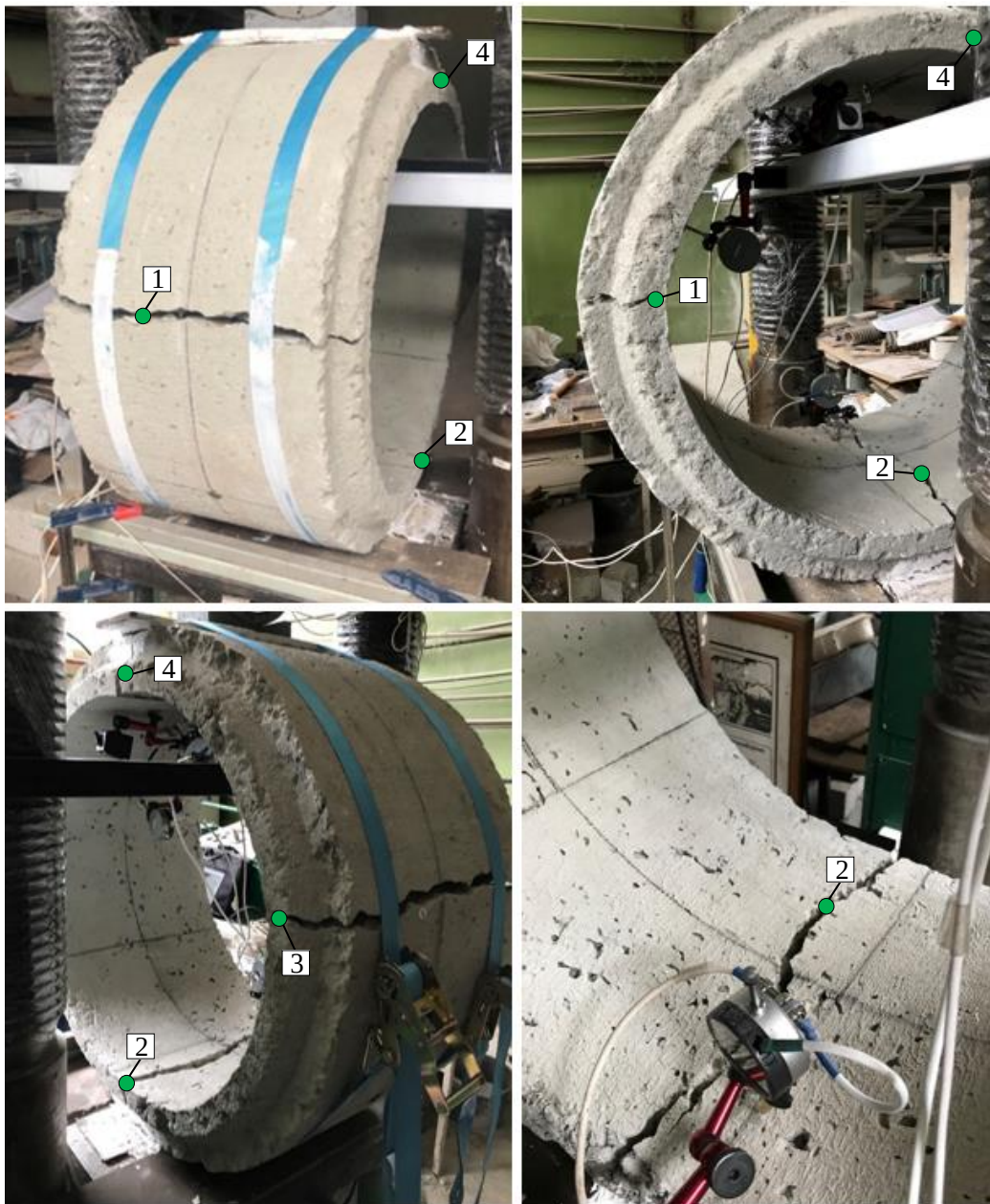


Рис. 4.30. Вигляд зразків серії I після руйнування: 1, 2, 3, 4 – номери тріщин

На рис. 4.31–4.33 наведено графіки залежності величин деформацій від прикладеного навантаження для дослідних зразків ТЗБ–1.1, ТЗБ–1.2 та ТЗБ–1.3, де ЦІ-1, ЦІ-2, ЦІ-3 – номери цифрових індикаторів відповідно до схеми їх розташування (див. п. 4.2.2). Отримані результати випробувань зразків серії І наведено в табл. 4.5.

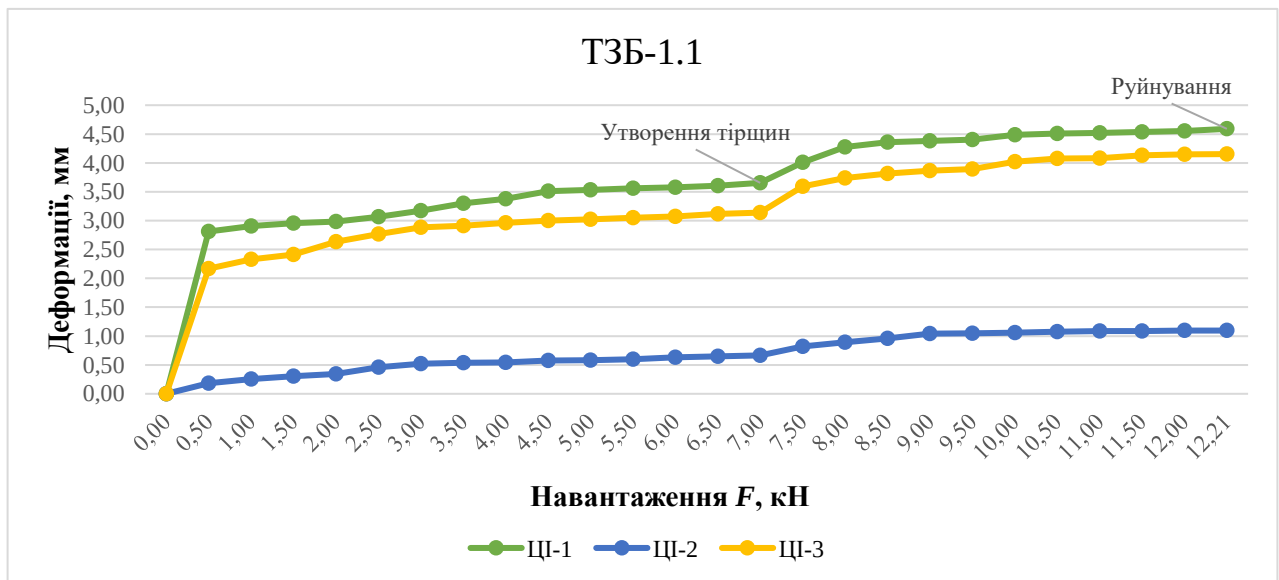


Рис. 4.31 Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–1.1

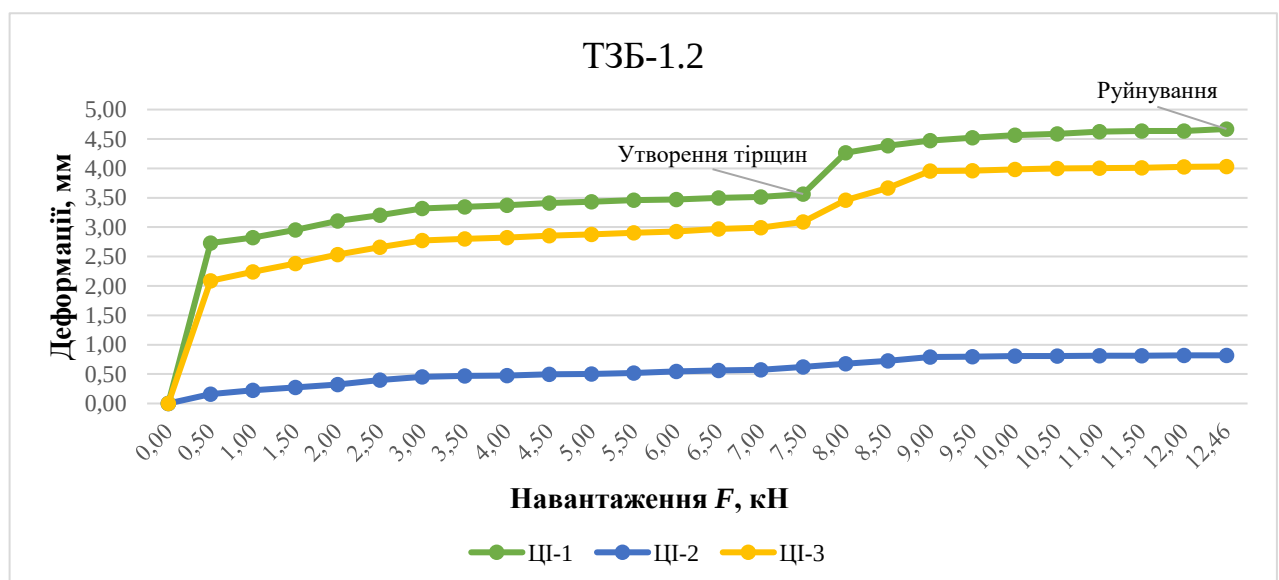


Рис. 4.32. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–1.2

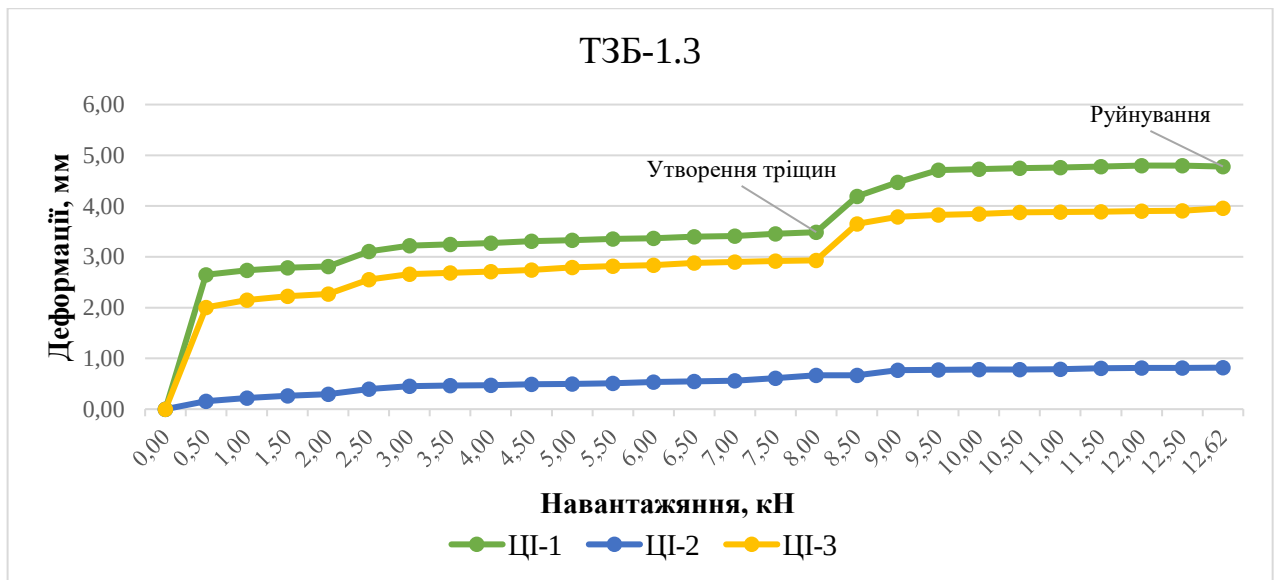


Рис. 4.33. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–1.3

Таблиця 4.5

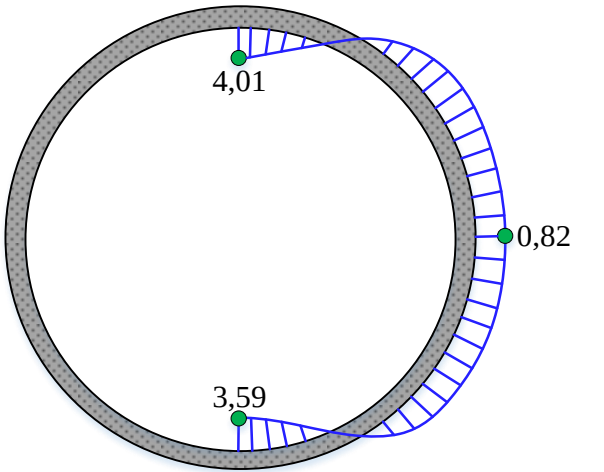
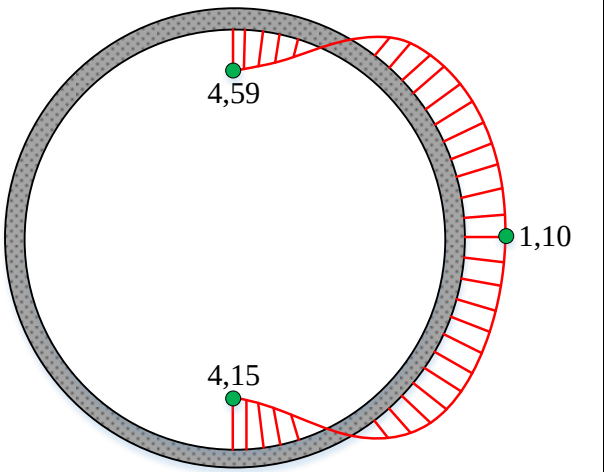
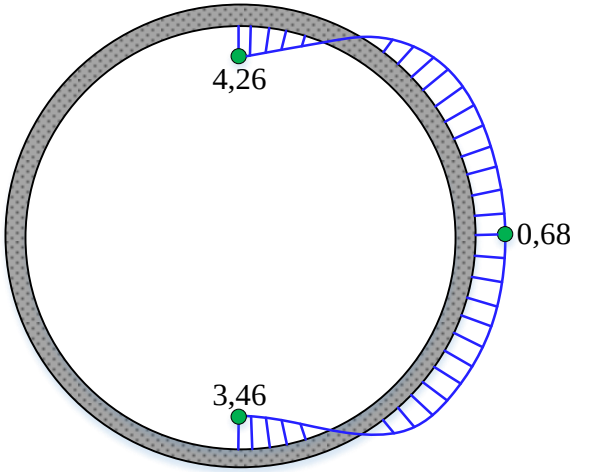
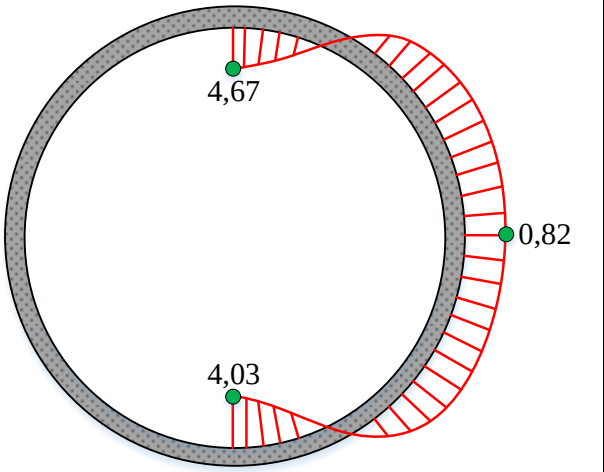
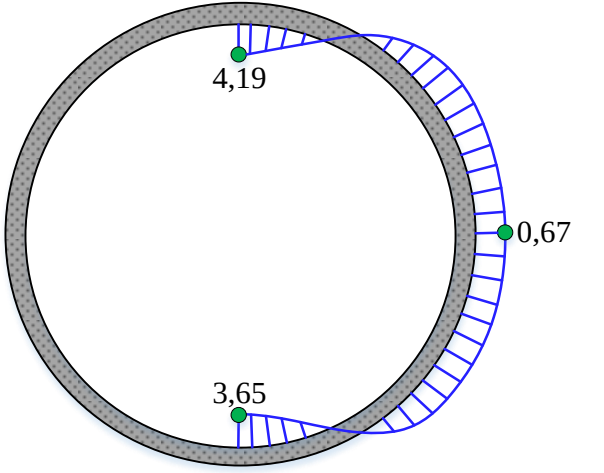
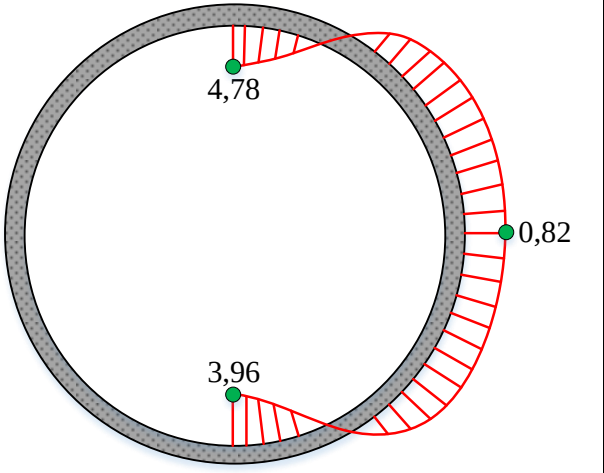
Результати випробування залізобетонних труб без підсилення серії І

№ п/п	Марка зразка	Руйнівне навантаження, кН	Максимальні деформації, мм	
			Утворення тріщин	Повне руйнування
1	ТЗБ–1.1	12,21	4,01	4,59
2	ТЗБ–1.2	12,46	4,26	4,67
3	ТЗБ–1.3	12,62	4,19	4,78
Середні:		12,43	4,15	4,68

Згідно отриманих результатів (див. табл. 4.5) випробувань залізобетонних труб без підсилення (серія І) середнє руйнівне навантаження становить 12,43 кН, що свідчить про відносно стабільні показники міцності серед досліджених зразків. Відповідно, максимальні деформації при утворенні тріщин досягали в середньому 4,15 мм, а при повному руйнуванні – 4,68 мм. Спостерігається незначний розкид у значеннях навантажень та деформацій між окремими зразками, що може бути зумовлено технологічними відмінностями у виготовленні зразків. Епюри розподілу деформацій для зразків залізобетонних труб без підсилення серії І у момент зародження тріщин та у момент повного руйнування наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Епюри розподілу деформацій у зразках залізобетонних труб без підсилення

Марка зразка	Деформації, мм	
	Утворення тріщин	Повне руйнування
ТЗБ–1.1		
ТЗБ–1.2		
ТЗБ–1.3		

Із табл. 4.6 видно, що максимальні деформації всі зразки серії I отримують у вертикальному напрямі. Максимальна величина вертикальної деформації зразка ТЗБ–1.1 у його вершині в момент початку утворення тріщин склала 4,01 мм. При цьому на боковій горизонтальній стороні – 0,82 мм. В основі зразка деформація склала 3,59 мм.

Максимальна величина вертикальної деформації зразка ТЗБ–1.1 при руйнуванні (табл. 4.6) склала 4,59 мм в основі труби, при цьому у вершині труби вертикальна деформація склала 1,10 мм. На боковій горизонтальній стороні, деформація склала 4,15 мм.

Для зразка ТЗБ–1.2 максимальна величина вертикальної деформації у його вершині в момент початку утворення тріщин – 4,26 мм. На боковій горизонтальній стороні – 0,68 мм та в основі труби – 3,45 мм.

Максимальна величина вертикальної деформації зразка ТЗБ–1.2 при руйнуванні склала 4,03 мм в основі труби, на вершині – 4,67 мм та боковій горизонтальній стороні – 0,82 мм.

Для зразка ТЗБ–1.3 максимальна величина вертикальної деформації на вершині в момент початку утворення тріщин – 4,19 мм. На боковій горизонтальній стороні – 0,67 мм та в основі труби – 3,65 мм.

Максимальна величина вертикальної деформації зразка ТЗБ–1.3 при руйнуванні склала 3,96 мм в основі труби, на вершині – 4,78 мм та боковій горизонтальній стороні труби – 0,82 мм.

4.3.2. Серія II. Залізобетонна труба, підсилена методом гільзування

Отримано результати випробувань дослідних зразків серії II: ТЗБ–2.1, ТЗБ–2.2, ТЗБ–2.3, несучу здатність яких було відновлено методом гільзування, описаного у п. 2.1. Вигляд зразків серії II після руйнування наведено на рис. 4.34.

Характер руйнування для всіх дослідних зразків серії II відповідав типовій схемі руйнування залізобетонних труб (див. п. 1.3). Руйнування розпочиналося з утворення та розвитку тріщин у розтягнутій зоні бетону, після чого відбувалося

поступове розкриття тріщин 1, 2, 3 та 4 і їх подальше поширення вздовж стінки труби (рис. 4.34). У критичній стадії навантаження спостерігалося руйнування захисного шару бетону та втрата несучої здатності. У деяких зразках відзначалося локальне відшарування гільзи від основної залізобетонної конструкції, що є наслідком поганого щеплення гладкої поверхні металевої гільзи до нового бетону.



Рис. 4.34. Вигляд зразків серії II після руйнування

Графіки залежності величин деформацій від прикладеного навантаження для дослідних зразків ТЗБ–2.1, ТЗБ–2.2 та ТЗБ–2.3 наведено на рис. 4.35–4.37, де ЦІ-1, ЦІ-2, ЦІ-3 – номери цифрових індикаторів відповідно до схеми їх розташування (див. п. 4.2.2). Отримані результати випробувань зразків серії II наведено в табл. 4.7.

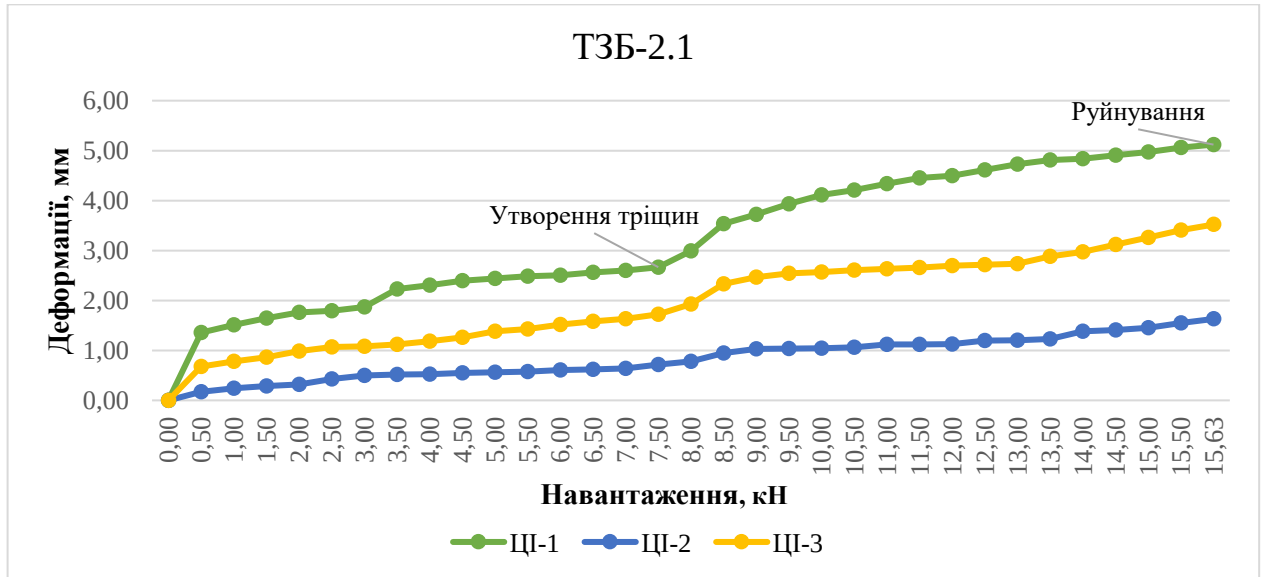


Рис. 4.35. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–2.1

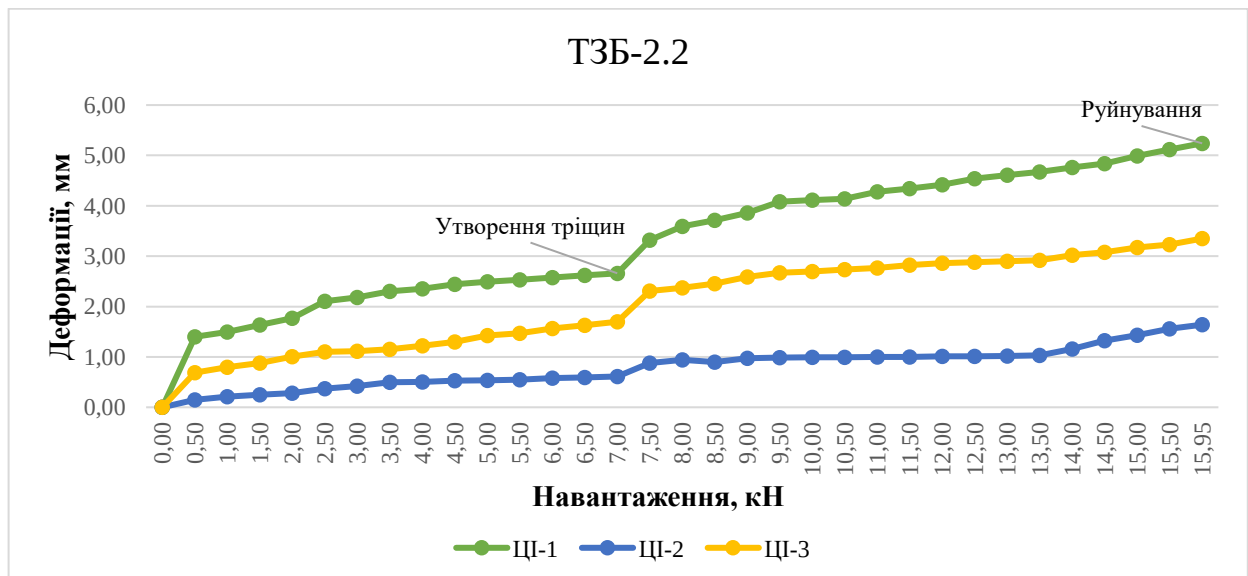


Рис. 4.36. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–2.2

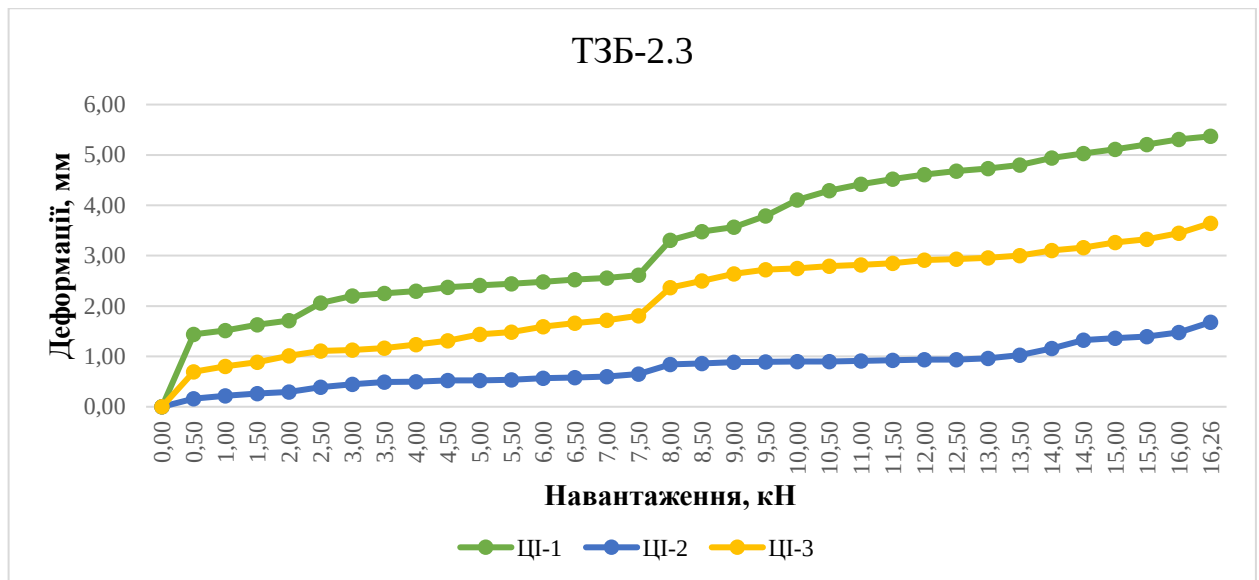


Рис. 4.37. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–2.3

Таблиця 4.7

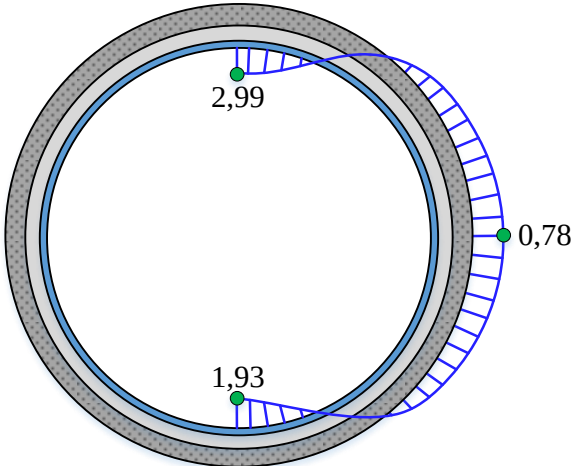
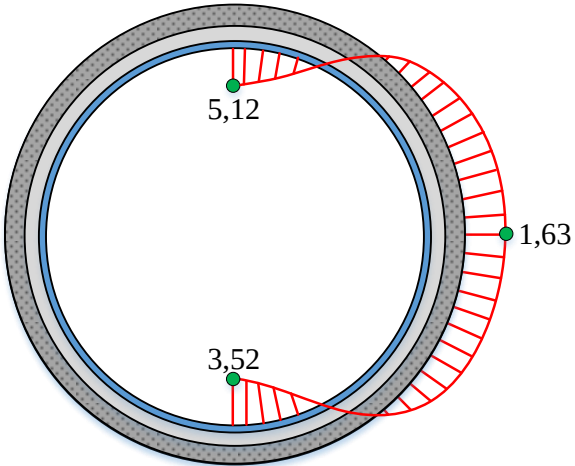
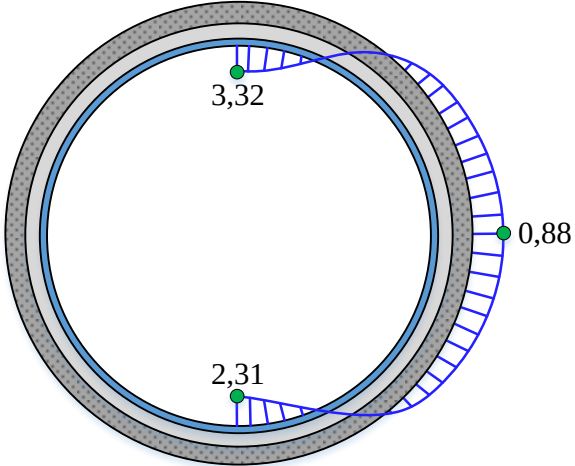
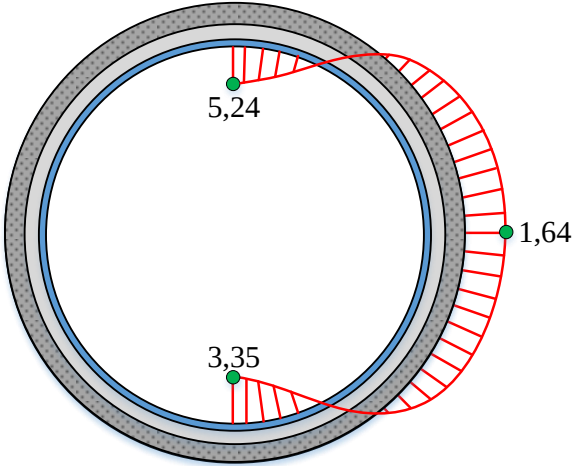
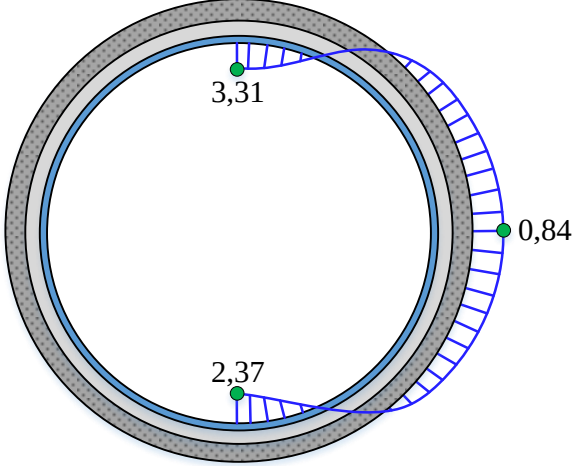
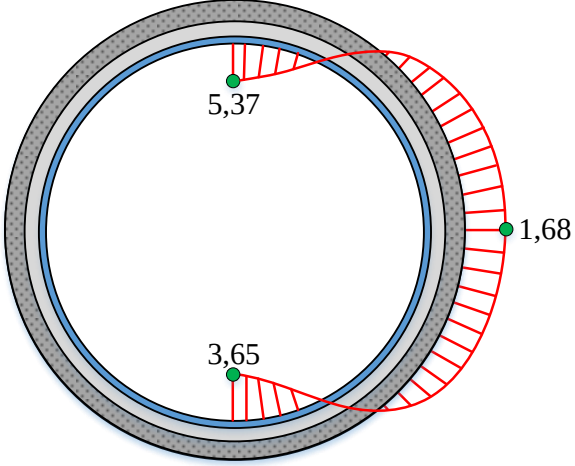
Результати випробування підсилених залізобетонних труб серії II

№ п/п	Марка зразка	Руйнівне навантаження, кН	Деформації, мм	
			Утворення тріщин	Повне руйнування
1	ТЗБ–2.1	15,63	2,99	5,12
2	ТЗБ–2.2	15,95	3,32	5,24
3	ТЗБ–2.3	16,26	3,31	5,37
Середні:		15,95	3,21	5,24

Результати випробувань (див. табл. 4.7) підсилених залізобетонних труб (серія II) свідчать про суттєве покращення їх несучої здатності порівняно з непідсиленими трубами. Середнє руйнівне навантаження зросло до 15,95 кН. Водночас, максимальні деформації при утворенні тріщин у середньому склали 3,21 мм, а при повному руйнуванні – 5,24 мм. Зменшення деформацій при появі тріщин вказує на підвищення жорсткості конструкції, тоді як збільшення граничних деформацій при руйнуванні свідчить про зростання загальної витривалості. Епюри розподілу деформованого стану зразків серії II у момент зародження тріщин та у момент повного руйнування наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Епюри розподілу деформацій у зразках пошкоджених залізобетонних труб
підсиленіх методом гільзування

Марка зразка	Деформації, мм	
	Утворення тріщин	Повне руйнування
ТЗБ–2.1		
ТЗБ–2.2		
ТЗБ–2.3		

З табл. 4.8 видно, що всі зразки зазнають найбільших деформацій у вертикальному напрямку. Для зразка ТЗБ–2.1 максимальна вертикальна деформація у його вершині на момент початку утворення тріщин склала 2,99 мм, на боковій горизонтальній стороні – 0,78 мм, а в основі – 1,93 мм. При руйнуванні зразка ТЗБ–2.1 максимальна вертикальна деформація в основі досягла 3,52 мм, у вершині – 5,12 мм, а на боковій горизонтальній стороні – 1,63 мм.

Для зразка ТЗБ–2.2 максимальна вертикальна деформація у вершині на момент появи тріщин склала 3,32 мм, на боковій горизонтальній стороні – 0,88 мм, а в основі труби – 2,32 мм. Під час руйнування вертикальна деформація в основі зразка ТЗБ–2.2 досягла 3,35 мм, у вершині – 5,24 мм, а на боковій горизонтальній стороні – 1,64 мм.

Для зразка ТЗБ–2.3 максимальна вертикальна деформація у вершині на початку утворення тріщин становила 3,31 мм, на боковій горизонтальній стороні – 0,84 мм, а в основі труби – 2,37 мм. У момент руйнування максимальна вертикальна деформація в основі зразка ТЗБ–2.3 досягла 3,35 мм, у вершині – 5,37 мм, а на боковій горизонтальній стороні – 1,68 мм.

4.3.3. Серія III. Залізобетонна труба, підсилена гільзуванням із додаванням арматурного каркасу

Отримано результати випробувань дослідних зразків серії III: ТЗБ–3.1, ТЗБ–3.2, ТЗБ–3.3, несучу здатність яких було відновлено методом гільзування із додатковим армуванням міжтрубного простору арматурним каркасом. Вигляд зразків серії III після руйнування наведено на рис. 4.38.

Характер руйнування для всіх дослідних зразків серії III мав подібні ознаки до руйнування підсилених залізобетонних труб серії II без додаткового армування, однак із певними особливостями, зумовленими наявністю арматурного каркаса. Руйнування розпочиналося з появи тріщин у розтягнутій зоні бетону, проте розвиток тріщин відбувався повільніше порівняно з серією II. Додаткове армування сприяло перерозподілу напружень, що призводило до більш рівномірного навантаження між внутрішньою гільзою та зовнішньою оболонкою. На заключних стадіях випробувань

спостерігалось поступове розкриття тріщин, однак арматурний каркас стримував їх надмірне поширення. Основне руйнування відбувалося внаслідок втрати зчеплення між арматурою та бетоном, що супроводжувалося локальним руйнуванням у місцях максимальних напружень та локальними відколами бетону. В окремих зразках відзначалося розшарування між старим і новим бетоном, проте рівень його розвитку був нижчим порівняно із зразками, підсиленими лише методом гільзування.



Рис. 4.38. Вигляд зразків серії III після руйнування

На рис. 4.39–4.41 наведено графіки залежності величин деформацій від прикладеного навантаження для дослідних зразків ТЗБ–3.1, ТЗБ–3.2 та ТЗБ–3.3, де ЦІ-1, ЦІ-2, ЦІ-3 – номери цифрових індикаторів відповідно до схеми їх розташування (див. п. 4.2.2). Результати випробувань зразків серії ІІІ наведено в табл. 4.9.

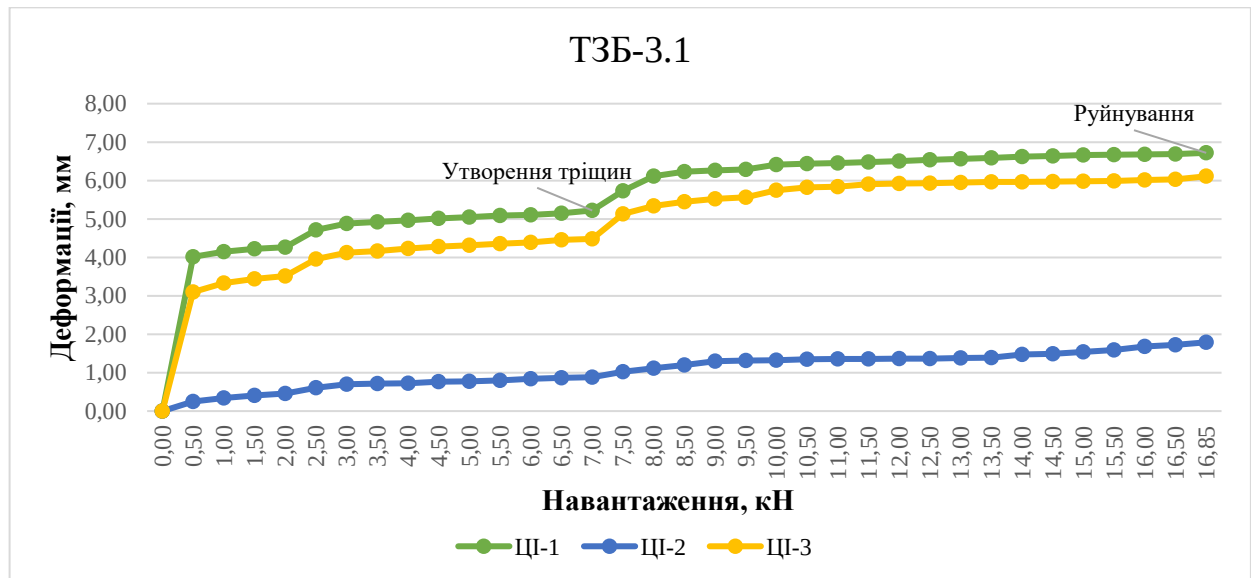


Рис. 4.39. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–3.1

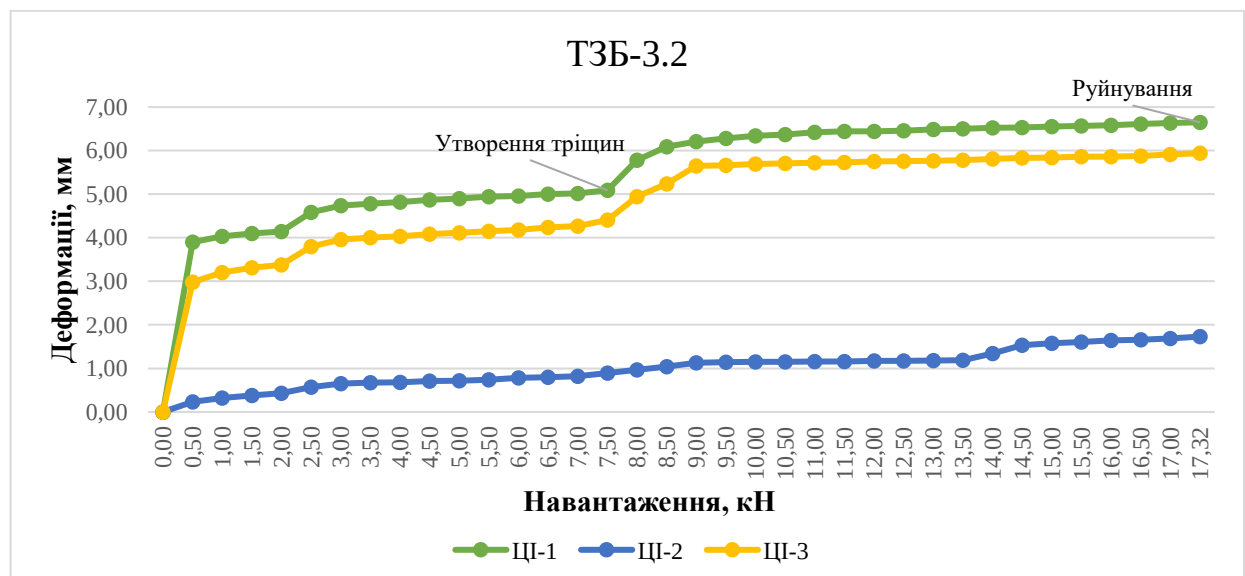


Рис. 4.40. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–3.2

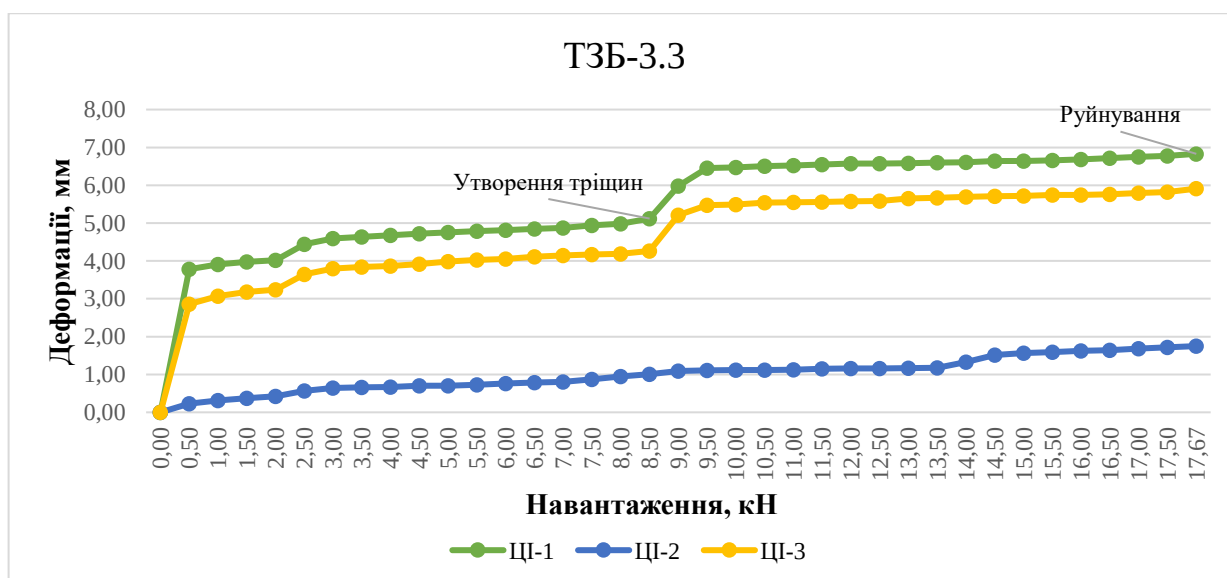


Рис. 4.41. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–3.3

Таблиця 4.9

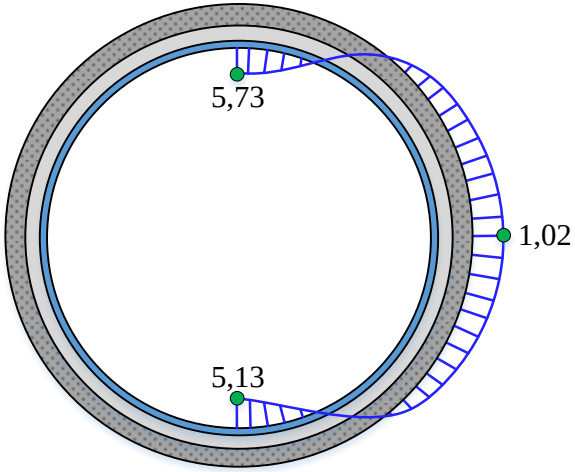
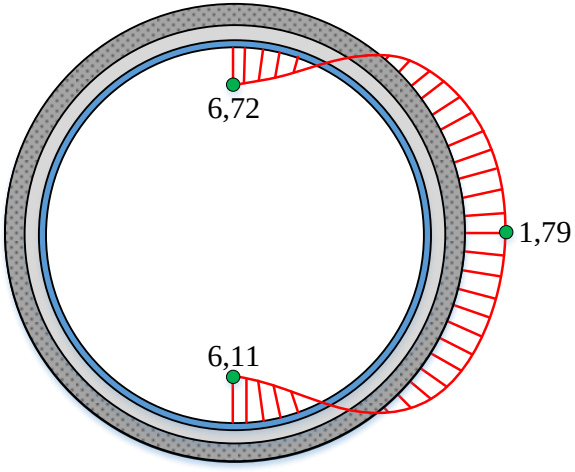
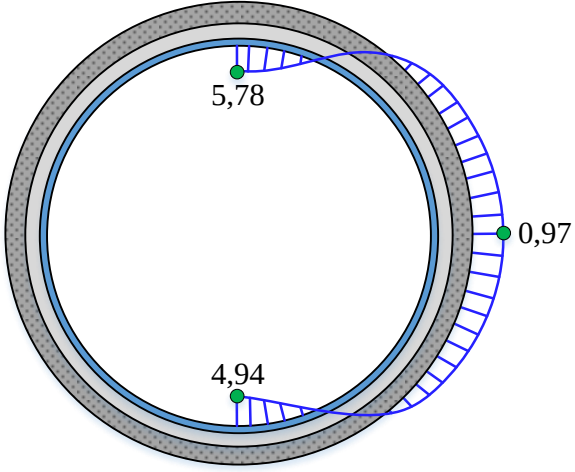
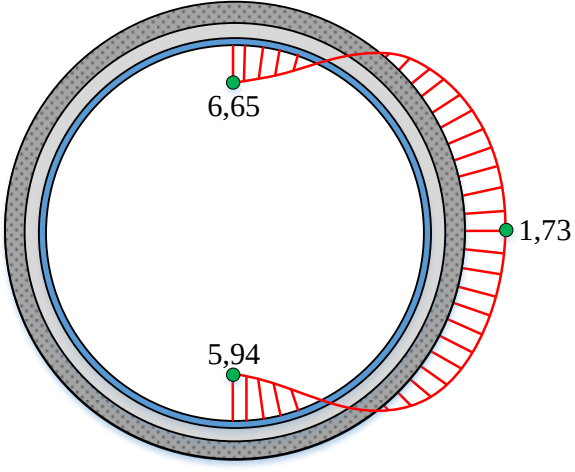
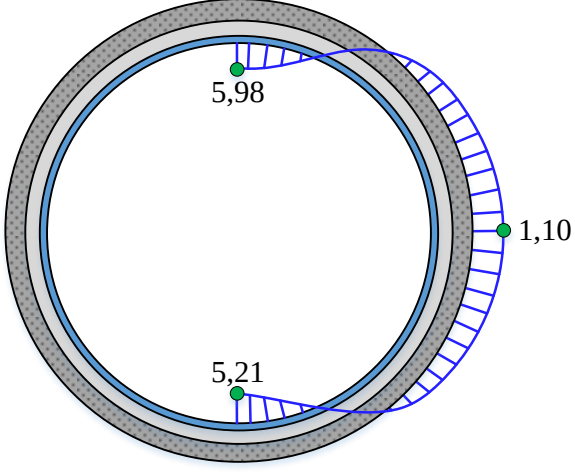
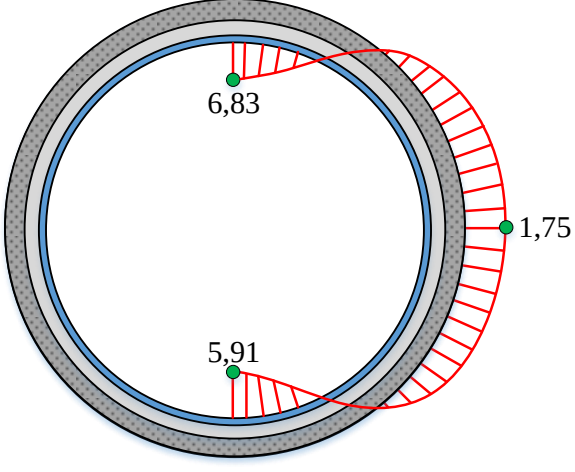
Результати випробування підсилених залізобетонних труб серії III

№ п/п	Марка зразка	Руйнівне навантаження, кН	Деформації, мм	
			Утворення тріщин	Повне руйнування
1	ТЗБ–3.1	16,85	5,73	6,72
2	ТЗБ–3.2	17,32	5,78	6,65
3	ТЗБ–3.3	17,67	5,98	6,83
Середні:		17,28	5,83	6,73

Результати випробувань (див. табл. 4.9) підсилених залізобетонних труб із додатковим арматурним каркасом (серія III) демонструють значне покращення їх несучої здатності у порівнянні з іншими серіями. Середнє руйнівне навантаження склало 17,28 кН. Деформації при утворенні тріщин збільшилися до 5,83 мм, а при повному руйнуванні – до 6,73 мм. Це свідчить про те, що арматурний каркас значно підвищує пластичність та витривалість конструкції, забезпечуючи її здатність сприймати більші навантаження до моменту руйнування. Епюри розподілу деформованого стану залізобетонних труб підсилених методом гільзування серії III у момент зародження тріщин та у момент повного руйнування наведено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10

Епюри розподілу деформацій у зразках пошкоджених залізобетонних труб
підсилених гільзуванням із додаванням арматурного каркасу

Марка зразка	Деформації, мм	
	Утворення тріщин	Повне руйнування
ТЗБ-3.1		
ТЗБ-3.2		
ТЗБ-3.3		

Як і в попередніх випадках всі зразки демонструють найбільші деформації у вертикальному напрямку (див. табл. 4.10). Для зразка ТЗБ–3.1 максимальна вертикальна деформація у вершині на момент початку утворення тріщин становила 5,73 мм, на боковій горизонтальній стороні – 1,02 мм, а в основі – 5,13 мм. Під час руйнування зразка ТЗБ–3.1 максимальна вертикальна деформація в основі досягла 6,11 мм, у вершині – 6,72 мм, а на боковій горизонтальній стороні – 1,79 мм.

Для зразка ТЗБ–3.2 максимальна вертикальна деформація у вершині на момент появи тріщин становила 5,78 мм, на боковій горизонтальній стороні – 0,97 мм, а в основі – 4,94 мм. При руйнуванні деформація в основі досягла 5,94 мм, у вершині – 6,65 мм, а на боковій стороні – 1,73 мм.

Для зразка ТЗБ–3.3, максимальна вертикальна деформація у вершині на момент початку тріщиноутворення склала 5,98 мм, на боковій горизонтальній стороні – 1,10 мм, а в основі – 5,21 мм. Під час руйнування максимальна вертикальна деформація в основі сягнула 5,91 мм, у вершині – 6,83 мм, а на боковій стороні – 1,75 мм.

4.3.4. Серія IV. Відновлені труби методом ін'єктування епоксидної суміші

Отримано результати випробувань дослідних зразків серії IV: ТЗБ-4.1, ТЗБ-4.2, ТЗБ-4.3, несучу здатність яких було відновлено методом ін'єктування. Вигляд зразків серії IV після руйнування наведено на рис. 4.42.

Характер руйнування для всіх дослідних зразків серії IV відрізнявся від попередніх серій завдяки застосуванню ін'єкційного заповнення тріщин епоксидним матеріалом. Основні руйнування розпочиналися у зонах концентрації напружень, зокрема поблизу старих тріщин, однак їх розвиток відбувався уповільнено. Нові тріщини формувалися у безпосередній близькості до старих, що пояснюється підвищеною міцністю заповнених епоксидною смолою ділянок, які демонстрували вищу несучу здатність порівняно з навколишнім бетоном.

Окрім цього, результати випробувань підтвердили, що ін'єктування не тільки відновлює міцність конструкції, але й частково підвищує її деформаційну здатність

до початку утворення тріщин. Це проявляється у більшій тривалості процесу руйнування, що робить такі конструкції більш передбачуваними у поведінці під навантаженням. Таким чином, застосування ін'єктування є ефективним методом відновлення залізобетонних труб, оскільки сприяє підвищенню їхньої довговічності та експлуатаційної надійності.

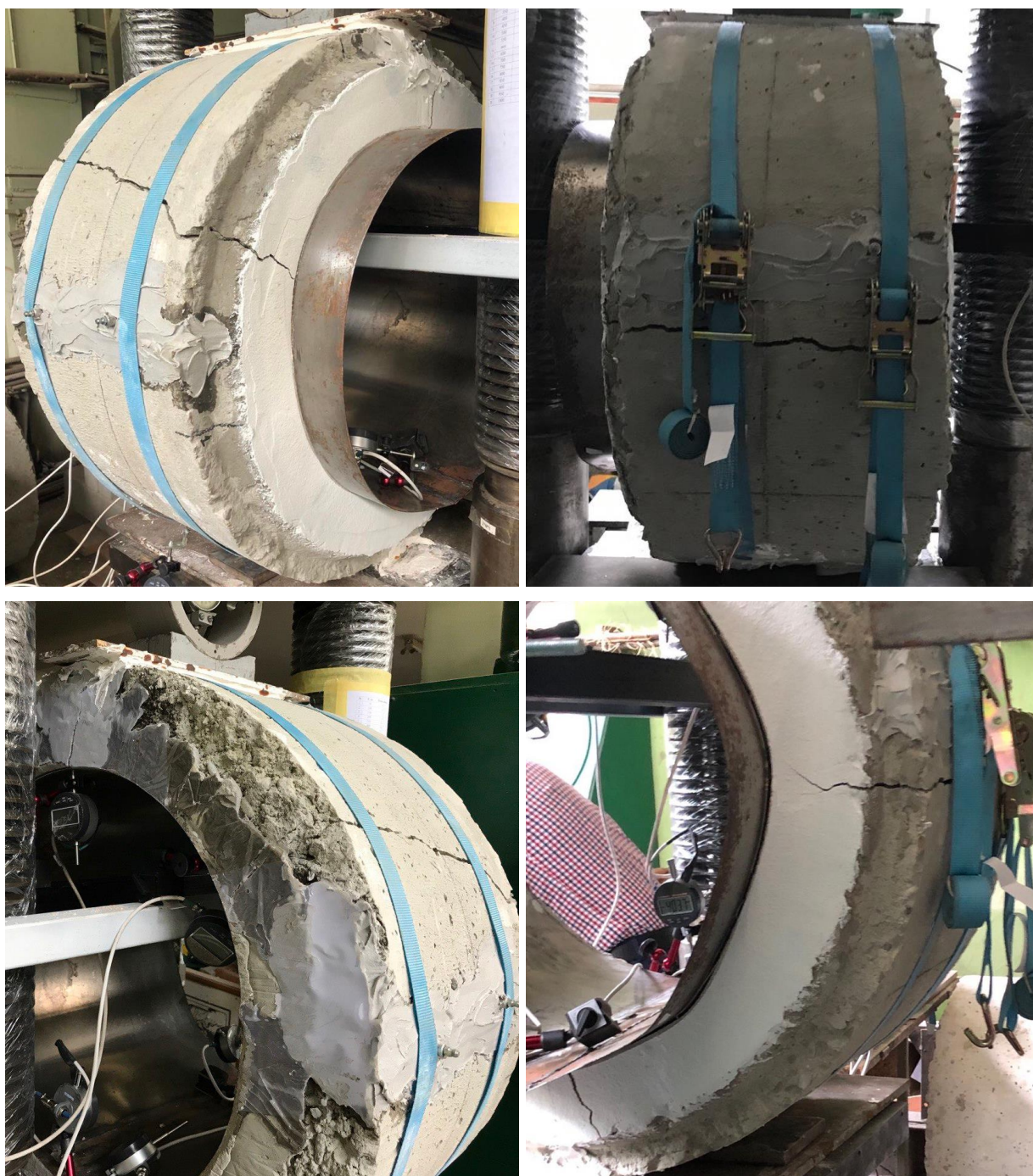


Рис. 4.42. Вигляд зразків серії IV після руйнування

Графіки залежності величин деформацій від прикладеного навантаження для дослідних зразків ТЗБ–4.1, ТЗБ–4.2 та ТЗБ–4.3 наведено на рис. 4.43–4.45, де *ЦІ-1*, *ЦІ-2*, *ЦІ-3* – номери цифрових індикаторів відповідно до схеми їх розташування (див. п. 4.2.2). Результати випробувань зразків серії IV наведено в табл. 4.11.

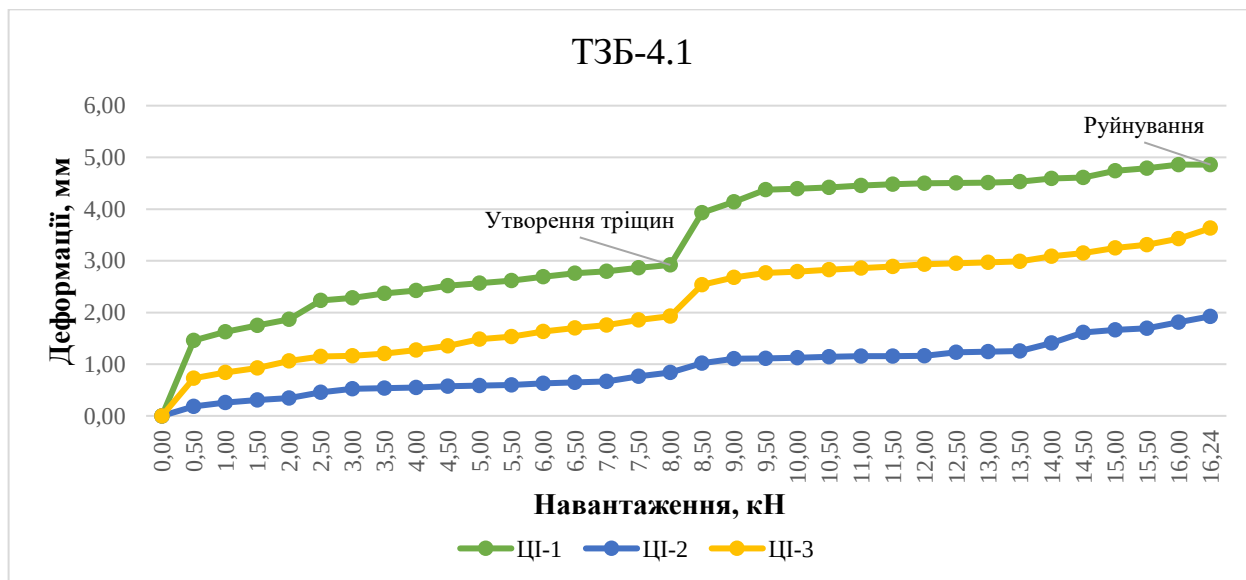


Рис. 4.43. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–4.1

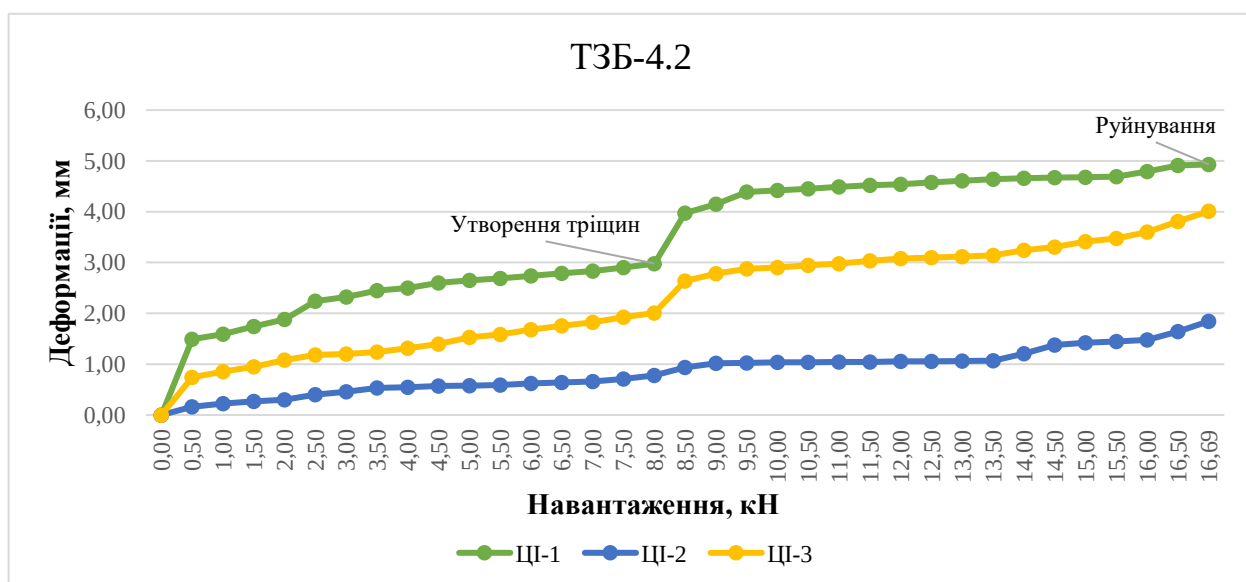


Рис. 4.44. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–4.2

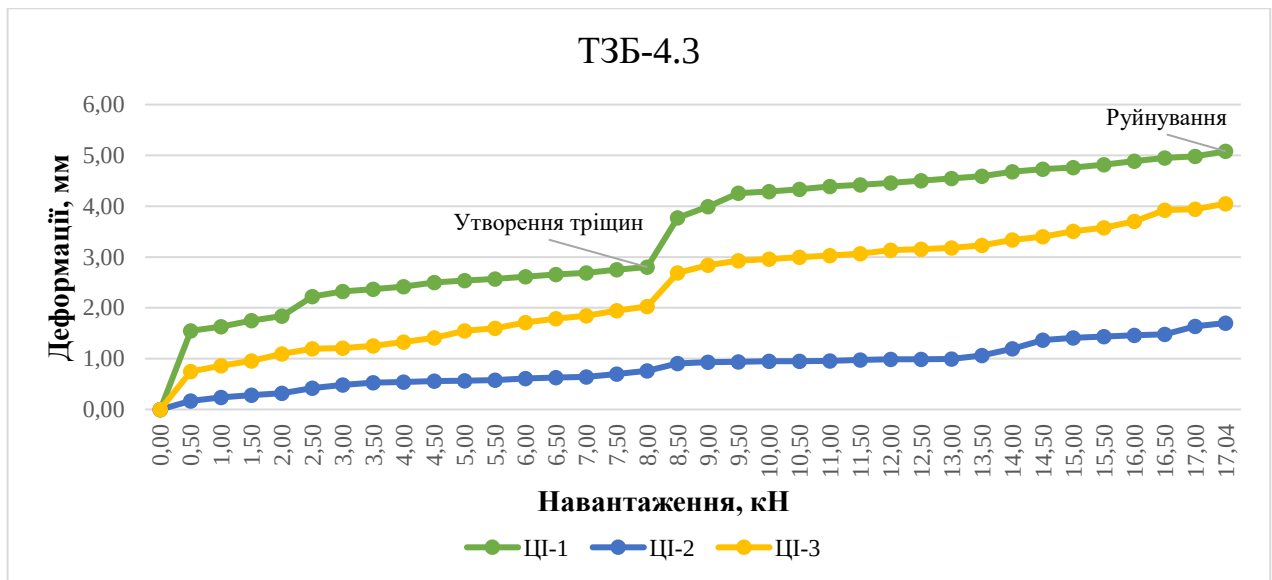


Рис. 4.45. Графік залежності деформацій від прикладеного навантаження для дослідного зразка ТЗБ–4.3

Таблиця 4.11

Результати випробування залізобетонних труб серії IV

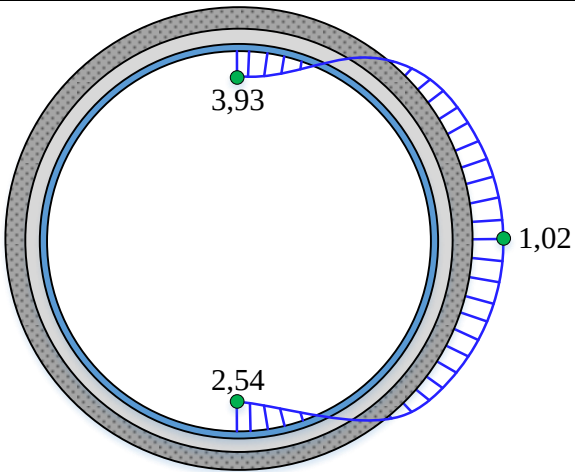
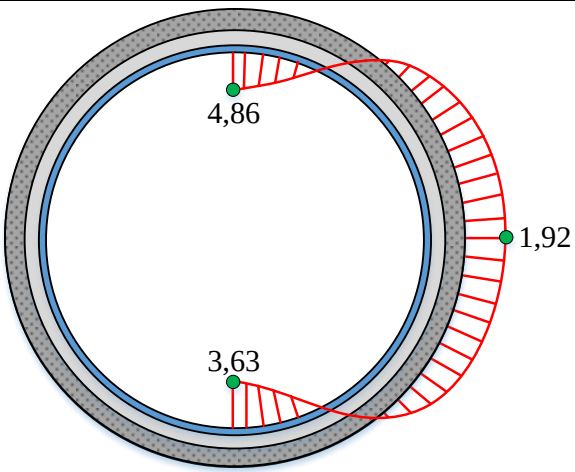
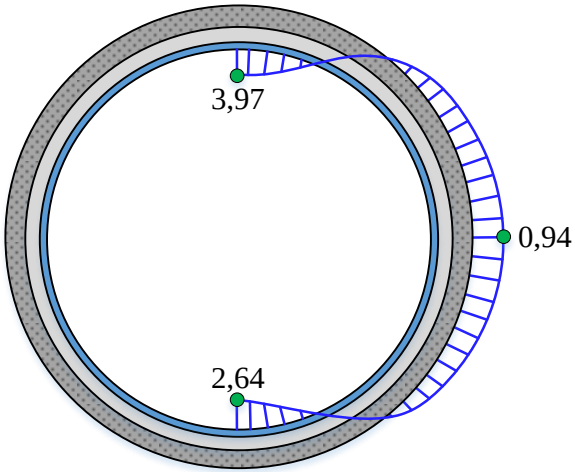
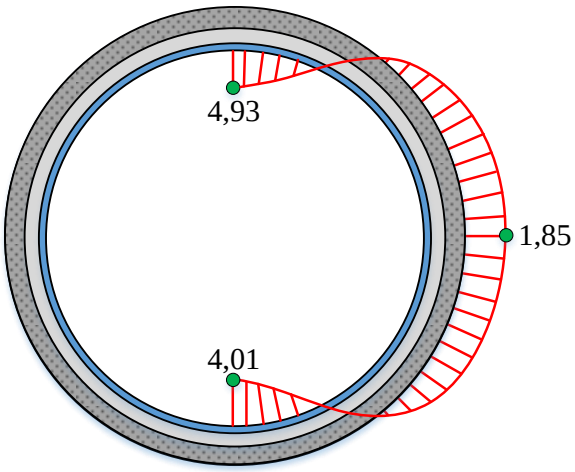
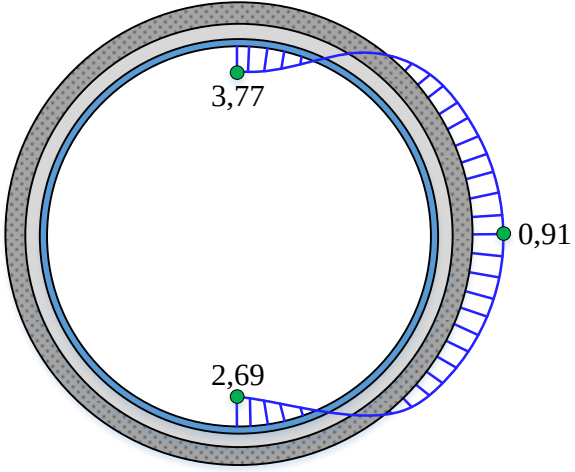
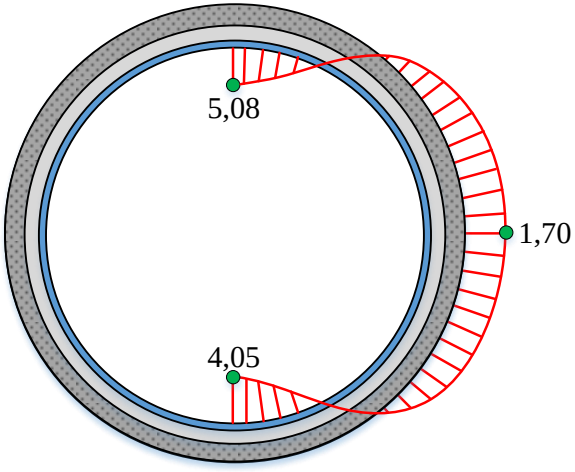
№ п/п	Марка зразка	Руйнівне навантаження, кН	Деформації, мм	
			Утворення тріщин	Повне руйнування
1	ТЗБ–4.1	16,24	3,93	4,86
2	ТЗБ–4.2	16,69	3,97	4,93
3	ТЗБ–4.3	17,04	3,77	5,08
Середні:		16,67	3,89	4,96

Результати випробувань (див. табл. 4.11) залізобетонних труб, підсилених методом ін'єктування, показують значне відновлення їх несучої здатності. Середнє руйнівне навантаження для цих труб становить 16,67 кН. Деформації при утворенні тріщин склали 3,89 мм, а при повному руйнуванні – 4,96 мм, що є вищими показниками у порівнянні з непідсиленними трубами, але меншими за відповідні значення для серій II та III.

Епюри розподілу деформованого стану пошкоджених гільзованих залізобетонних труб підсилених методом ін'єктування серії IV у момент зародження тріщин та у момент повного руйнування наведено в табл. 4.12.

Таблиця 4.12

Епюри розподілу деформацій у зразках пошкоджених гільзованих залізобетонних труб підсилених методом ін'єктування

Марка зразка	Деформації, мм	
	Утворення тріщин	Повне руйнування
ТЗБ-4.1		
ТЗБ-4.2		
ТЗБ-4.3		

Як видно з табл. 4.12, усі зразки демонструють максимальні деформації у вертикальному напрямку. У зразка ТЗБ–4.1, на момент появи тріщин, найбільша вертикальна деформація становила 3,93 мм у верхній частині, на боковій горизонтальній стороні – 1,02 мм, а в основі – 2,54 мм. При руйнуванні цього зразка вертикальна деформація в основі досягла 3,63 мм, у верхній частині – 4,86 мм, а на боковій горизонтальній стороні – 1,93 мм.

Для зразка ТЗБ–4.2 найбільша вертикальна деформація у верхній частині на початку утворення тріщин дорівнювала 3,97 мм, на боковій стороні – 0,94 мм, а в основі – 2,64 мм. Під час руйнування деформація в основі склала 4,01 мм, у верхній частині – 4,93 мм, а на боковій горизонтальній стороні – 1,85 мм.

У зразка ТЗБ–4.3 максимальна вертикальна деформація в момент виникнення тріщин становила 3,77 мм у верхній частині, 0,91 мм на боковій горизонтальній стороні та 2,69 мм в основі. При руйнуванні вертикальна деформація в основі досягла 4,05 мм, у верхній частині – 5,08 мм, а на боковій стороні – 1,70 мм.

4.4. Аналіз результатів досліджень напружено-деформованого стану підсиленних залізобетонних труб при дії силових навантажень

Порівняльний аналіз несучої здатності, деформацій і напружень для всіх типів дослідних зразків дозволяє оцінити ефективність запропонованих методів підсилення залізобетонних труб. Виконані дослідження продемонстрували, що підсилення за допомогою гільзування, гільзування з додаванням арматурного каркасу та ін'єктування суттєво впливає на механічні характеристики труб, змінюючи їхню поведінку під навантаженням.

На основі узагальнених даних, наведених у табл. 4.13, визначено середні значення руйнівних навантажень та деформацій для кожної серії зразків, що дає змогу здійснити кількісне порівняння між експериментальними випробуваннями та вихідними характеристиками зразків без підсилення.

Згідно з отриманими результатами, підсилення гільзуванням забезпечує помірне підвищення несучої здатності та жорсткості, тоді як додавання арматурного

каркасу значно покращує ці показники, дозволяючи конструкції сприймати більші навантаження без утворення критичних деформацій. Водночас метод ін'єктування, який застосовувався для відновлення зруйнованих труб, демонструє унікальну здатність уповільнювати розвиток тріщин і покращувати структурну цілісність бетону в місцях попередніх руйнувань.

Таблиця 4.13

Результати випробувань залізобетонних труб усіх серій

№ п/п	Серія	Марка зразка	Руйнівне навантаження, кН	Деформації, мм	
				Утворення тріщин	Повне руйнування
1	I	ТЗБ–1.1	12,21	4,01	4,59
2		ТЗБ–1.2	12,46	4,26	4,67
3		ТЗБ–1.3	12,62	4,19	4,78
Середні:			12,43	4,15	4,68
4	II	ТЗБ–2.1	15,63	2,99	5,12
5		ТЗБ–2.2	15,95	3,32	5,24
6		ТЗБ–2.3	16,26	3,31	5,37
Середні:			15,95	3,21	5,24
7	III	ТЗБ–3.1	16,85	5,73	6,72
8		ТЗБ–3.2	17,32	5,78	6,65
9		ТЗБ–3.3	17,67	5,98	6,83
Середні:			17,28	5,83	6,73
10	IV	ТЗБ–4.1	16,24	3,93	4,86
11		ТЗБ–4.2	16,69	3,97	4,93
12		ТЗБ–4.3	17,04	3,77	5,08
Середні:			16,67	3,89	4,96

Для наочного відображення отриманих результатів на рис. 4.46 наведено графічне порівняння середніх значень деформацій для зразків усіх серій у момент утворення тріщин та в момент руйнування.

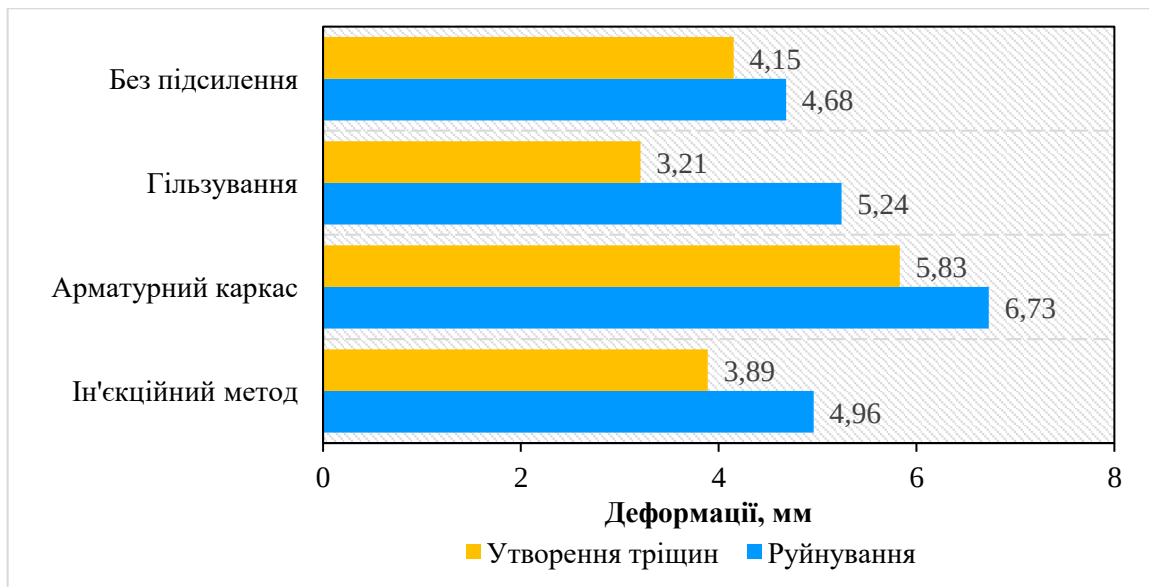


Рис. 4.46. Порівняння деформативності для різних методів підсилення залізобетонних труб

Діаграма (рис. 4.46) дозволяє простежити вплив кожного методу підсилення на поведінку конструкції під навантаженням, зокрема на здатність труб сприймати деформації до моменту руйнування. Очікувано, що підсилені труби демонструють вищу стійкість до розвитку тріщин та підвищену деформативність у граничному стані. Метод гільзування дозволив збільшити максимальні деформації у момент руйнування на 12 %, додавання арматурного каркасу на 44 %, а відновлення ін'єкційною технологією на 6 % порівняно з деформаціями труб без підсилення.

Аналіз отриманих даних свідчить, що гільзування, гільзування з армуванням та ін'єктування суттєво впливають на розподіл напружень у матеріалі, що відображається у збільшенні допустимих деформацій до руйнування. Особливо це помітно у зразках, підсиленних гільзуванням із армуванням (44 %), що підтверджує ефективність додаткового армування в підвищенні жорсткості та несучої здатності труби.

Графічне порівняння дозволяє зробити висновок про доцільність застосування різних методів підсилення залежно від необхідного рівня жорсткості, деформаційної здатності та залишкового ресурсу залізобетонних труб.

На діаграмі (рис. 4.47) наведено порівняння середніх значень руйнівного навантаження для всіх серій дослідних зразків. Наведені дані дозволяють оцінити

ефективність різних методів підсилення щодо підвищення несучої здатності залізобетонних труб.

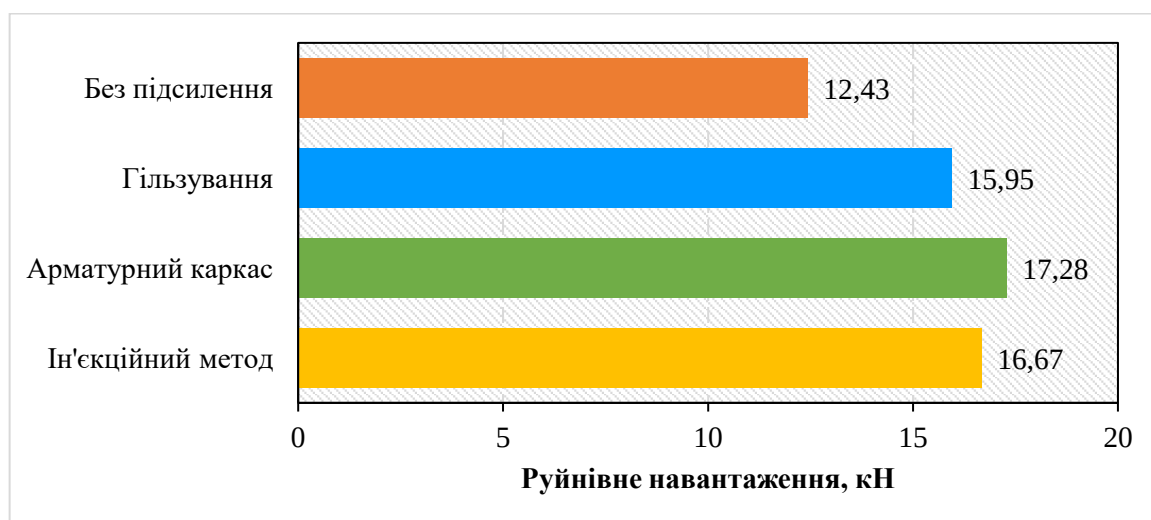


Рис. 4.47. Порівняння середніх значень руйнівного навантаження для різних методів підсилення залізобетонних труб

Як видно з діаграми (рис. 4.47), застосування методів гільзування, гільзування з армуванням міжтрубного простору та ін'єктування забезпечує суттєве зростання руйнівного навантаження порівняно з непідсиленими зразками, що підтверджує доцільність їх використання для відновлення та посилення труб.

Аналіз отриманих результатів показав, що застосування методу гільзування сприяє підвищенню несучої здатності залізобетонних труб на 28 % у порівнянні з еталонними зразками. Водночас додаткове армування міжтрубного простору просторовим арматурним каркасом збільшує цей показник до 39 %, що свідчить про значний вплив армування на покращення міцності конструкції. Метод ін'єктування, який забезпечує відновлення структури матеріалу шляхом заповнення тріщин високоміцними композитними складами, демонструє приріст несучої здатності на 34 % порівняно з еталонними зразками.

Важливо зазначити, що в ході дослідження для зміцнення ін'єкційними технологіями використано зруйновані зразки залізобетонних труб, попередньо підсилені методом гільзування. Таким чином, порівняно зі зразками, підсиленими лише методом гільзування, додаткова ефективність методу ін'єктування становить

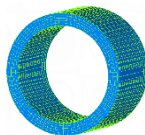
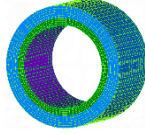
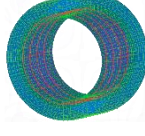
6 %. Це свідчить про доцільність використання ін'єктування як додаткового заходу підсилення, особливо у випадках, коли пошкодження труб є значними, а метод гільзування вже був застосований.

Отримані результати вказують на те, що всі запропоновані методи підсилення є ефективними, проте найбільший приріст несучої здатності забезпечує поєднання гільзування із додатковим армуванням. Це підтверджує доцільність використання даного методу для підсилення дефектних залізобетонних труб, особливо в умовах підвищених навантажень.

Результати експериментальних випробувань залізобетонних труб серій I–IV порівняні з даними чисельного моделювання, виконаного методом скінченних елементів, для оцінювання напружено-деформованого стану дослідних зразків (табл. 4.14).

Таблиця. 4.14

Порівняння результатів експериментальних випробувань із комп'ютерним моделюванням

№ п/п	Тип підсилення	Ескіз	Навантаження <i>F</i> , кН	Методика розрахунку		Різниця, %
				Комп'ютерне моделювання	Експериментальне випробування	
1	Без підсилення		5,0	3,23	3,53	9,3
2			8,0	4,08	4,28	4,9
3			10,0	4,42	4,73	7,0
4			15,0	4,95	-	-
5	Гільзування		5,0	2,29	2,49	8,7
6			8,0	3,05	3,31	8,5
7			10,0	3,88	4,11	5,9
8			15,0	4,77	4,98	4,4
9	Арматурний каркас		5,0	4,61	5,05	9,4
10			8,0	5,94	6,11	2,8
11			10,0	6,18	6,41	3,7
12			15,0	6,31	6,65	5,4

Аналіз отриманих даних показав, що максимальне відхилення експериментально визначених деформацій від розрахункових значень не перевищує 10 %, що свідчить про високу точність використаної методики чисельного моделювання та її надійність у прогнозуванні поведінки підсилених залізобетонних труб. Виявлена відповідність результатів підтверджує ефективність застосованих методів підсилення та доводить доцільність використання комп'ютерного моделювання, як достовірного інструменту для аналізу напружено-деформованого стану водопропускних труб при розробці проєктних рішень і проведенні інженерних досліджень.

Відмінність між експериментальними та теоретичними результатами пояснюються комплексом факторів, зокрема особливостями реальних матеріалів, умовами випробувань, а також наближеними припущеннями, що використовуються при числовому моделюванні.

Одним із ключових чинників є нерівномірність фізико-механічних властивостей бетону, яка зумовлена як технологічними особливостями виготовлення труб, так і можливими дефектами структури матеріалу, що виникають у процесі експлуатації. Крім того, вплив людського фактора при встановленні та закріпленні підсилювальних елементів міг спричинити незначні відхилення у їхньому розташуванні та взаємодії з основною конструкцією.

Щодо числового моделювання, то воно базується на певних ідеалізованих припущеннях, таких як рівномірність розподілу напружень та деформацій, що не завжди повною мірою відповідає реальним умовам навантаження та роботи конструкції. У випадку підсилених зразків вплив окремих дефектів або локальних концентрацій напружень, які можуть з'являтися через нерівномірний контакт між старою та новою оболонкою труби, може змінювати фактичну картину розподілу навантажень і спричиняти додаткові відмінності у результатах.

Також варто зазначити, що метод гільзування та гільзування з армуванням передбачає появу нових контактних поверхонь між матеріалами, що в реальних умовах може викликати нерівномірний розподіл напружень та місцеві концентрації деформацій. У випадку ін'єктування визначальну роль відіграє адгезія епоксидного

матеріалу до бетону, яка може змінюватися залежно від стану поверхонь та технології виконання робіт.

Попри ці відмінності, загальна тенденція змін напружено-деформованого стану підтверджує ефективність обраних методів підсилення, що верифікується як експериментальними, так і числовими результатами.

4.5. Техніко-економічна ефективність запропонованих рішень

Розроблені методи підсилення залізобетонних труб оцінювалися не лише з точки зору їхньої економічної доцільності, а й з урахуванням їхніх технічних переваг, зокрема підвищення несучої здатності, рівня відновлення конструкційної міцності та довговічності відремонтованих труб. Запропоновані технології дозволяють суттєво покращити експлуатаційні характеристики труб без необхідності їх повного демонтажу, що є важливим фактором з точки зору мінімізації витрат та скорочення термінів виконання робіт.

Аналіз отриманих результатів випробувань показав, що всі запропоновані методи підсилення мають високу ефективність у підвищенні несучої здатності труб. Зокрема, метод гільзування дозволяє збільшити несучу здатність конструкції на 28 %, метод гільзування з додатковим армуванням міжтрубного простору – на 39 %, а ін'єктування – на 34 %. Важливо зазначити, що гільзування забезпечує не лише відновлення, а й посилення жорсткості труби, що робить її більш стійкою до тривалих експлуатаційних навантажень. Використання додаткового армування у міжтрубному просторі ще більше підвищує довговічність конструкції, забезпечуючи рівномірний розподіл напружень та мінімізуючи ризик утворення тріщин. Однак кожен із методів має свої особливості та техніко-економічні переваги, які слід враховувати при виборі оптимального методу відновлення.

Оцінка техніко-економічної ефективності запропонованих методів підсилення залізобетонних труб проводилась на основі кошторисних розрахунків для типової залізобетонної водопропускної труби круглого перерізу, яка застосовується у дорожньому та залізничному будівництві відповідно до стандартних проектних

рішень. Розрахунковий приклад базується на трубі діаметром 1,0 м та загальною довжиною 10 м з урахуванням оголовків на обох кінцях.

З точки зору вартості, метод ін'єктування є найбільш економічно вигідним, оскільки його реалізація передбачає мінімальні матеріальні витрати, відсутність потреби у великогабаритному обладнанні та швидке виконання робіт. Його вартість становить 232 469 грн, що на 35 % дешевше, ніж повна заміна труби. Однак його ефективність суттєво залежить від якісного заповнення дефектів, що може вимагати додаткового контролю. Метод гільзування без армування коштує 278 875 грн, що на 22 % дешевше за заміну труби, а з використанням арматурного каркасу – 280 940 грн, що на 21 % дешевше. Незначне зростання вартості гільзування з армуванням пов'язане з додатковими витратами на арматурний каркас, однак отримані технічні переваги повністю виправдовують ці інвестиції, адже така конструкція витримує вищі навантаження та має довший термін експлуатації.

З точки зору витрат, вартість реалізації кожного з методів підсилення була розрахована на основі матеріальних та трудових ресурсів, необхідних для виконання робіт. Кошториси на виконання заміни пошкоджених водопропускних залізобетонних труб та їх підсилення пропонованими методами наведені в Додатку В.

Графічне порівняння вартості відновлення несучої здатності залізобетонних труб наведено на рис. 4.48.

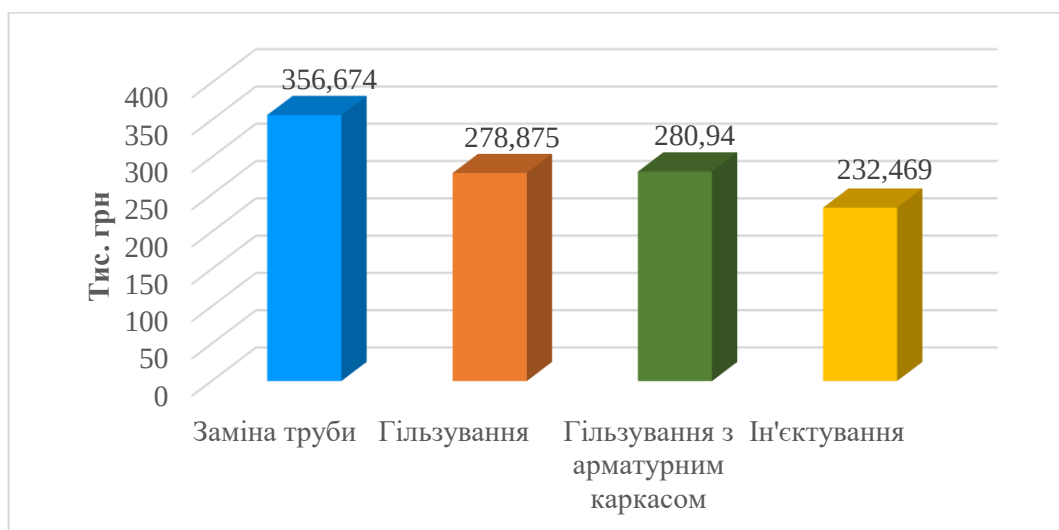


Рис. 4.48. Порівняння вартості запропонованих методів відновлення залізобетонних труб

Проте ефективність підсилення визначається не лише економічними показниками, а й технічними параметрами. Метод гільзування з армуванням забезпечує найефективніше підвищення несучої здатності, що робить його доцільним для застосування в умовах інтенсивного навантаження. Ін'єктування, хоч і є найбільш економічним методом, має обмежену сферу використання, оскільки його ефективність значною мірою залежить від якості заповнення тріщин та міцності адгезійного матеріалу.

При виконанні економічного розрахунку варіанту із повною заміною труби не враховувалася вартість перекриття руху та потенційні фінансові втрати, пов'язані з порушенням транспортного сполучення на автомобільних дорогах або залізничних коліях. В умовах високої інтенсивності руху навіть короточасне перекриття може спричинити значні економічні збитки через затримки перевезень, підвищене споживання пального транспортними засобами через об'їзні маршрути, а також збільшене навантаження на інші ділянки дорожньої або залізничної мережі.

На відміну від заміни, технології ін'єктування та гільзування дозволяють проводити підсилення труб без необхідності повного перекриття руху. У більшості випадків роботи можуть виконуватися без демонтажу верхнього покриття дороги або без призупинення залізничного руху, що є вагомою перевагою. Це дозволяє уникнути витрат на організацію об'їздів, тимчасових дорожніх розв'язок або залізничних переїздів, а також мінімізує витрати на залучення додаткової техніки для демонтажу та повторного облаштування дорожнього полотна.

Крім того, у випадку автомобільних доріг уникнення перекриття руху дозволяє зменшити фінансові втрати бізнесу, пов'язані з порушенням логістичних маршрутів, а на залізничному транспорті – уникнути штрафних санкцій за затримки вантажних і пасажирських перевезень. У підсумку, враховуючи всі непрямі витрати, запропоновані методи підсилення не лише ефективні з точки зору конструктивних характеристик, а й є більш економічно доцільними, ніж традиційна заміна труб.

Таким чином, запропоновані методи підсилення залізобетонних труб є не лише технічно ефективними, а й економічно доцільними. Вони дозволяють значно продовжити термін експлуатації конструкцій, мінімізувати витрати на їх ремонт та

уникнути значних капіталовкладень, пов'язаних із повною заміною труб. Залежно від конкретних умов експлуатації, можна обрати оптимальний варіант: ін'єктування – для швидкого та маловитратного ремонту, гільзування – для комплексного відновлення, а гільзування з армуванням – для підсилення конструкції, що працює в умовах підвищених навантажень.

Висновки до розділу 4

Аналіз результатів експериментальних випробувань залізобетонних труб, підсилених запропонованими методами, дозволяє сформулювати такі висновки:

1. Проведені випробування показали, що всі запропоновані методи підсилення сприяють суттєвому збільшенню несучої здатності залізобетонних труб та максимальних деформацій при руйнуванні. Зокрема, у зразках, підсилених методом гільзування, руйнування відбулося при деформаціях на 12 % вищих від контрольних зразків без підсилення – 5,24 мм проти 4,68 мм відповідно. При застосуванні гільзування з додатковим арматурним каркасом граничні деформації зросли до 6,73 мм, що на 44 % більше, ніж у зразках без підсилення. Метод ін'єктування, використаний для відновлення попередньо зруйнованих труб з гільзуванням, забезпечив зростання граничних деформацій до 4,96 мм, що відповідає приросту на 6 %.

2. Найбільш ефективним методом підсилення з точки зору підвищення несучої здатності виявилось гільзування з армуванням міжтрубного простору, яке забезпечило її зростання на 39 % порівняно з еталонними зразками. Середнє руйнівне навантаження для таких труб становило 17,28 кН, проти 12,43 кН у труб без підсилення. Метод гільзування без армування збільшив цей показник до 15,95 кН, що відповідає приросту на 28 %, а застосування методу ін'єктування дозволило досягти середнього руйнівного навантаження 16,67 кН, що становить зростання на 34 % порівняно з вихідними характеристиками.

3. Результати експериментальних випробувань підтвердили дані, отримані за допомогою числового моделювання, виконаного методом скінченних елементів.

Максимальна різниця між теоретичними та експериментальними значеннями деформацій не перевищує 10 %, що свідчить про високу точність обраної методики моделювання.

4. Встановлено, що метод гільзування створює нові контактні поверхні між матеріалами, що може впливати на розподіл напружень та спричиняти локальні концентрації деформацій. У випадку ін'єктування ефективність значною мірою залежить від якості заповнення тріщин та міцності зчеплення ремонтного матеріалу з бетоном.

5. Аналіз економічної ефективності показав, що підсилення залізобетонних труб є економічно доцільною альтернативою повній заміні конструкцій. Метод ін'єктування є найбільш економічним варіантом, дозволяючи зменшити витрати на 35 % у порівнянні з заміною труби. Вартість гільзування без армування є на 22 % нижчою, а гільзування з армуванням – на 21 % нижчою від вартості заміни труби.

6. Загальні результати досліджень підтверджують, що застосування запропонованих методів підсилення є ефективним засобом підвищення несучої здатності та подовження експлуатаційного терміну залізобетонних труб. Вибір конкретного методу має базуватися на аналізі технічних вимог до конструкції та економічної доцільності його застосування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень у дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача з розробки методів відновлення та підвищення несучої здатності і довговічності водопропускних залізобетонних труб. Основні наукові результати та висновки полягають у наступному:

1. Проведено аналіз технічного стану водопропускних залізобетонних труб на автомобільних і залізничних дорогах України та огляд інженерно-технічних методів підвищення їх несучої здатності. Встановлено, що значна частина конструкцій дефектна та потребує підсилення або відновлення. Основними причинами дефектів є вплив змінних навантажень, довготривала експлуатація та агресивне середовище. Обґрунтовано доцільність підсилення для відновлення технічного стану водопропускних залізобетонних труб.

2. Розроблено та вдосконалено методи підсилення водопропускних залізобетонних труб, а саме: метод гільзування, метод гільзування з армуванням та метод відновлення за допомогою ін'єктування, які дозволять підвищити несучу здатність таких конструкцій при мінімальних втратах робочого перерізу.

3. Виконано чисельне моделювання напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб методом скінченно-елементного аналізу з урахуванням впливу статичних і динамічних навантажень та температурних впливів. Встановлено, що при зосередженому навантаженні у вертикальній площині силою в 15 кН максимальні деформації залізобетонної труби без підсилення складають 4,61 мм, при підсиленні методом гільзування – 7,54 мм, а з використанням арматурного каркасу – 7,40 мм.

4. Удосконалено математичну модель розрахунку напружено-деформованого стану підсилених залізобетонних труб при дії статичних навантажень та температурних впливів. Визначено розподіл напружень у тришарових конструкціях підсилених залізобетонних труб – встановлено зони концентрації напружень на межі контактних поверхонь матеріалів. При одночасній дії статичного навантаження та температурного впливу величина переміщень у підсиленій трубі складає 0,64 мм та в

металевій внутрішній трубі – 0,75 мм. Максимальні радіальні напруження σ_{rr} досягають 37,4 МПа в дефектній трубі та 20,92 МПа в елементі посилення – металевій трубі. При цьому, максимальні осьові напруження σ_{zz} складають 30,24 МПа та 141 МПа відповідно, тоді як кільцеві напруження $\sigma_{\varphi\varphi}$ досягають 77,34 МПа та 151 МПа.

5. Проведено експериментальні випробування зразків водопропускних залізобетонних труб, підсилених різними методами, для підтвердженні ефективності запропонованих технологій. Встановлено, що для зразків без підсилення (еталон) середнє значення руйнівного навантаження становить 12,43 кН. Середні деформації при утворенні тріщин складають 4,15 мм, а при повному руйнуванні – 4,68 мм. Застосування методу гільзування забезпечує зростання середнього руйнівного навантаження до 15,95 кН, що збільшує несучу здатність на 28%. При цьому деформації при утворенні тріщин становлять 3,21 мм, а при повному руйнуванні – 5,24 мм. У випадку використання додаткового арматурного каркасу середнє руйнівне навантаження зростає до 17,28 кН, що збільшує несучу здатність на 39%. Деформації при утворенні тріщин досягають 5,83 мм, а при повному руйнуванні – 6,73 мм. Метод ін'єктування, застосований для відновлення попередньо зруйнованих труб, підсилених гільзуванням, забезпечує середнє руйнівне навантаження на рівні 16,67 кН, що збільшує несучу здатність на 34%. У цьому випадку середні деформації при утворенні тріщин становлять 3,89 мм, а при повному руйнуванні – 4,96 мм.

6. Виконано порівняльний аналіз теоретичних і експериментальних досліджень, що показало задовільну збіжність результатів (до 10 %) скінченно-елементного аналізу для оцінювання напружено-деформованого стану підсилених водопропускних залізобетонних труб.

7. Визначено техніко-економічну ефективність запропонованих методів, зокрема доведено, що підсилення водопропускних залізобетонних труб є раціональною альтернативою їх повної заміни. Метод ін'єктування дозволяє зменшити витрати на 35 % у порівнянні із заміною, гільзування – на 22 %, а гільзування із додатковим армування – на 21 %. Це підтверджує ефективність запропонованих методів підсилення водопропускних залізобетонних труб.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Потійчук О. Б., Піліпака Л. М. Транспортні розв'язки [Електронне видання] : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2020. 263 с.
2. ДСТУ 8814:2018. Транспортні споруди. Мости автодорожні. Терміни та визначення понять. [Чинні від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2018. 17 с.
3. Осетрін М. М., Беспалов Д. О., Тарасюк В. П. Міські дорожньо-транспортні споруди : конспект лекцій для студентів. Київ : КНУБА, 2022. 55 с.
4. Безлюбченко О. С., Гордієнко С. М., Завальний О. В. Планування міст і транспорт : навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 270 с.
5. Installation of concrete storm sewer pipes and manholes that you have never seen [Електронний ресурс]. Engineering Discoveries. URL: <https://engineeringdiscoveries.com/installation-of-concrete-storm-sewer-pipes-and-manholes-that-you-have-never-seen> (дата звернення: 11.02.2025).
6. Бойчук В. С., Кірічек Ю. О. Сільськогосподарські дороги та майданчики : підручник. Київ : Урожай, 2000. 312 с.
7. Бойчук В. С., Кірічек Ю. О., Сергєєв О. С. Штучні споруди на автомобільних дорогах : підручник. Дніпропетровськ : ПДАБА, 2004. 364 с.
8. Alonso P., Teveliv Y. Los principios de Hormigon armado sobre una base de suela cociderando la regidez real de las unions de juntas // 145 Resumenes conferencia cientifico tecnica. Cuba. Villa Clara, 1983. P. 12–15.
9. Ольховик О. І., Білецький А. А. Технологія будівництва гідротехнічних, водогосподарських та природоохоронних споруд : навч. посіб. [Електронне видання]. Рівне : НУВГП, 2019. 377 с.
10. Мусієнко І. В. Автоматизований розрахунок прямокутних дорожніх водопропускних труб у програмі УКРРВС 22 / І. В. Мусієнко // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету : зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т ; редкол.: А. Г. Батракова (гол. ред.) та ін. Харків, 2022. Вип. 98. С. 114–119.

11. Кірічек Ю. О., Балашова Ю. Б., Легка Н. В. Застосування армування при проєктуванні автомобільних доріг на органогенних глинистих ґрунтах // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2010. Вип. 78. С. 114–120. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2010_78_18 (дата звернення: 14.04.2023).
12. Corrugated Steel Pipe Institute. Handbook of steel drainage & highway construction products : 2nd Canadian ed. Canada : American Iron and Steel Institute, 2009. 112 p.
13. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Highway drainage guidelines : 4th ed. Washington, D.C. : AASHTO, 2007. 316 p.
14. Camões A., Ferreira R. M. Technological evolution of concrete: from ancient times to ultra high-performance concrete // Structures and Architecture. 2010. P. 1571–1578.
15. Хоменко О. Г. Залізобетонні конструкції : навч. електрон. посіб. Глухів, 2017. 208 с.
16. Marston A., Anderson A. O. The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe. Ames, Iowa : Engineering Experiment Station, Bulletin 31, 1913. 118 p.
17. American Concrete Pipe Association. Concrete Pipe Design Manual. Washington : American Concrete Pipe Association, 1970. 312 p.
18. McGrath T. J. Development of design and analysis methods for buried culverts // Transportation Research Circular. 2018. Number E-C230. P. 1–12.
19. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз проєктування та будівництва гідротехнічних споруд транспортного будівництва у вигляді водопропускних труб з полімерних матеріалів на автомобільних дорогах // Дороги і мости. 2021. Вип. 24. С. 112–133. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.112>.
20. Jafari N. H., Ulloa H. O. Literature Search on Use of Flexible Pipes in Highway Engineering for DOTD's Needs. Baton Rouge : Dept. of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, 2020. 63 p.

21. ASTM International. C76-19b. Standard Specification for Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe. [Чинні від 2019]. URL: <https://doi.org/10.1520/C0076-19B>.
22. AS/NZS 1254 Stormwater. Sydney : Standards Australia, 2012. 28 p.
23. AS/NZS 1260 Drain, waste and vent. Sydney : Standards Australia, 2009. 92 p.
24. AS 1273 Rainwater downpipes. Sydney : Standards Australia, 1991. 18 p.
25. AS 5100:2017 Bridge Design. [Чинні від 2017]. Sydney : Standards Australia, 2017. 438 p.
26. AS/NZS 3500 Plumbing and Drainage. [Чинні]. Sydney : Standards Australia, 2003. 356 p.
27. AS/NZS 3572:1997 Plastics – Glass Filament Reinforced Plastics (Grp). [Чинні]. Sydney : Standards Australia, 1997. 44 p.
28. AS 1597.1-2010, AS 1597.2-2013 Precast Reinforced Concrete Box Culverts – Small Culverts, Large Culverts. [Чинні]. Sydney : Standards Australia, 2013. 64 p.
29. Austroads. Guide to Road Design. Part 5, 5A, 5B: Drainage – General and Hydrology Considerations, Road Surface, Networks, Basins and Subsurface, Open Channels, Culverts and Floodways. Sydney : Austroads, 2013. 258 p.
30. Roads and Maritime Services (RMS). QA Specification R11 Stormwater Drainage. Sydney : RMS, 2015. 37 p.
31. Roads and Maritime Services (RMS). QA Specification R16 Precast Reinforced Concrete Box Culverts. Sydney : RMS, 2016. 41 p.
32. Roads and Maritime Services (RMS). QA Specification R23 Plastic Flexible Pipes. Sydney : RMS, 2017. 26 p.
33. Roads and Maritime Services (RMS). QA Specification R53 Concrete (for General Use), Mortar and Grout. Sydney : RMS, 2018. 33 p.
34. Roads and Maritime Services (RMS). QA Specification B80 Concrete Work for Bridges. Sydney : RMS, 2019. 54 p.
35. Roads and Traffic Authority (RTA). Rehabilitation Guideline for Corrugated Steel Culverts. Sydney : RTA, 2011. 48 p.

36. Kang J., Jung Y., Ahn Y. Cover requirements of thermoplastic pipes used under highways // Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 55. P. 184–192.
37. Normann J. M., Houghtalen R. J., Johnston W. J. Hydraulic design of highway culverts. 2nd ed. Washington, D.C. : FHWANHI-01-020, HDS No. 5, 2001. 300 p.
38. ATV-DVWK-A 127-2000-08. Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen. 3. Auflage. Hennef : ATV-DVWK, 2000. 128 S.
39. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. [Чинні від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінбуд України, 2006. 218 с.
40. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинні від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2015. 104 с.
41. ДСТУ Б В.2.5-63:2012. Труби безнапірні залізобетонні вібропресовані з циліндричним арматурним каркасом. Загальні технічні умови. [Чинні від 2013-01-04]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. 20 с.
42. ДБН В.2.3-6:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження та випробування. [Чинні від 2010-03-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 64 с.
43. ДСТУ Б В.2.5-46:2010. Труби залізобетонні безнапірні. Технічні умови (ГОСТ 6482-88, MOD). [Чинні від 2012-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2010. 87 с.
44. Шадура В. О., Кравченко Н. В. Водопостачання та водовідведення : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2018. 343 с.
45. Андрійчук О. В. Робота і розрахунок елементів кільцевого перерізу зі сталевібробетону при повторних навантаженнях : дис. канд. техн. наук : 05.23.01. Львів, 2011. 156 с.
46. Suleiman Muhannad Taher. The structural performance of flexible pipes. 2002. Retrospective Theses and Dissertations. 1033. 143 p.
47. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Технічний стан транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика 2021, 19, 38-50 с. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233873>.

48. Давиденко О. О. Моделювання життєвого циклу автодорожніх мостів : дис. канд. техн. наук : 05.23.17. Київ, 2017. 170 с.
49. Дехтяр А. С. Оптимальна експлуатація залізобетонних мостів // Системні методи керування, технології та організації виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів. Київ, 2001. Вип. 12. С. 385–392.
50. Дехтяр А. С. Оптимальні терміни і об'єми ремонту залізобетонних мостів // Ремонт та експлуатація мостів : наук. праці фізико–технічного інституту НАНУ ім. Карпенка. Львів, 2001. С. 17–24.
51. Лантух-Лященко А. І. До проєкту державних будівельних норм з оцінки технічного стану мостів // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. Львів : Каменярь, 2000. Вип. 1. С. 78–83.
52. Лантух-Лященко А. І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : зб. наук. пр. Київ : Український транспортний університет, 1999. Вип. 57. С. 183–188.
53. Янчук Л. Л. Моделювання життєвого циклу залізобетонних елементів мостів, що знаходяться в експлуатації // Вісник ХНАДУ. Харків, 2015. № 58. С. 118–123.
54. ДБН В.2.3–22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Вводяться на заміну ДБН В.2.3-14:2006. [Чинні від 2010-03-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 52 с.
55. ДСТУ Б.В.2.3-24:2009. Труби дорожні. Обстеження та оцінювання технічного стану. [Чинні від 2010-08-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 29 с.
56. Kovalchuk V. V. Erweiterung der Verkehrsanlagen durch den Einsatz von Wellblechstrukturen auf Rai und Strassen Ukraine // Перспективні технології ремонту земляного полотна та верхньої будови колії : матеріали міжнар. техн. семінару. 20–21 жовтня 2015 р.

57. Wyant D. Assessment and Rehabilitation of Existing Culverts. NCHRP Synthesis of Highway Practice No. 303. Washington, D.C. : Transportation Research Board, 2002.
58. Тютюкін О. Л., Остапенко І. С. Підсилення фундаментів автомобільних мостів в контексті проблемного стану транспортно-дорожнього комплексу // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2020. № 18. С. 106–112.
59. Зберегти довжину залізничного полотна без ринкового тарифу: місія нездійснення // Укрзалізниця. URL: <https://info.uz.ua/articles/zберегти-dovzhinu-zaliznichnogo-polotna-bez-rinkovogo-tarifu-misiya-nezdiysnenna> (дата звернення: 15.08.2022).
60. Петрович В. В., Скрипник Т. В., Скрипник В. Ю., Чечуга О. С., Малько М. М. Досвід експлуатаційного утримання водопропускних труб на дорозі Т-08-15 в Запорізькій області // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2011. Вип. 81. С. 160–167.
61. Гаркуша М. В. Вплив пошкоджених гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб на навколишнє середовище // Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг : зб. тез V міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 11–13 жовтня 2023 р.). Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка». С. 82–83.
62. Гаркуша М. В. Впливу корозії на технічний стан дорожніх водопропускних труб та сучасні методи їх ремонту // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), ч.І DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.57-66](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.57-66)
63. Meegoda J. N., Juliano T. M., Tang C. Culvert Information Management System – Demonstration Project. Newark (NJ) : New Jersey Institute of Technology, 2009. 51 p.
64. Гармаш А. В., Соломка В. І., Горбова О. В. Оцінювання технічного стану залізобетонних мостів // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2011. Вип. 39. С. 33–36. DOI: 10.15802/stp2011/6868.

65. Онищенко А. М. Аналіз перспективи застосування ремонту, методом гільзування, водопропускних труб, як різновиду гідротехнічних споруд транспортного будівництва // Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії : зб. наук. пр. за підсумками щоріч. міжнар. наук.-практ. конф. Херсон, 2021. Вип. 3. С. 147–150.

66. Kovalchuk V., Koval M., Onyshchenko A., Kravets I., Bal O., Markul R., Vikhot S., Petrenko O., Rybak R., Milyanych A. Determining the Strained State of Prefabricated Metal Corrugated Structures of a Tunnel Overpass Exposed to the Dynamic Loading from Railroad Rolling Stock // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 3, No. 7(117). P. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259439>.

67. Служба відновлення та розвитку інфраструктури у Тернопільській області. URL: <https://www.facebook.com/share/p/19TLGCsS9j> (дата звернення: 25.02.2024)

68. Kovalchuk V., Markul R., Pentsak A., [та ін.]. Study of the Stress-Strain State in Defective Railway Reinforced-Concrete Pipes Restored with Corrugated Metal Structures // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 5 (1–89). С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109611>.

69. Пшінько О. М., Краснюк А. В., Громова О. В. Вибір матеріалів для ремонту та відновлення бетонних та залізобетонних конструкцій транспортних споруд з урахуванням критерію сумісності. 2015.

70. Ковальчук В. В. Стан та проблеми забезпечення довговічності прогонових будов мостів [Текст] / В. В. Ковальчук // Збірник наукових праць ДОНІЗТ. – 2012. – № 32. – С. 226–235.

71. Коваль П. М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій [Текст] / П. М. Коваль, І. П. Баб'як, Т. М. Сітдикова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. 2010. № 39. – С. 114–117.

72. ДБН 2.3-6-2002. Споруди транспорту. Мости і труби. Обстеження і випробування.

73. Пшинько А. Н., Руденко, Н. Н. Проблеми ремонту інженерних транспортних споруд // Залізничний транспорт України. 2000. № 3. С. 12–14.
74. Настанови з ремонту бетонних та залізобетонних конструкцій мостів і труб, що експлуатуються, № ЦП-0148, затверджена Наказом Укрзалізниці від 21.02.2006, № 192-ЦЗ.
75. Чечуга, О. С., Каськів, В. І., Петрович, В. В. Математичне моделювання процесу взаємодії круглої залізобетонної труби з ґрунтом середовища під дією зовнішнього навантаження // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Київ: НТУ, 2012. – Вип. 85. С. 193–199.
76. Бліхарський З. Я. Залізобетонні конструкції в агресивному середовищі та за дії навантаження та їх підсилення: монографія / З. Я. Бліхарський – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 296 с.
77. Lin J., Tian B., Liang Z., Hu E., Liu Z., Wang K., Sang T. Impact of Water–Cement Ratio on Concrete Mechanical Performance: Insights into Energy Evolution and Ultrasonic Wave Velocity // Materials. 2024. Vol. 17, No. 15. Article number: 3651 DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17153651>.
78. Zhang J., Li J., Zhao Y., Wang S., Guan Z. Concrete Cover Cracking and Reinforcement Corrosion Behavior in Concrete with New-to-Old Concrete Interfaces // Materials. 2023. Vol. 16, No. 17. Article number: 5969 DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175969>
79. Кропивницька Т. П., Саницький М. А., Гев'юк І. М. Вплив карбонатних добавок на властивості портландцементу композиційного // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2013. № 755. С. 214–220.
80. Коваль П. М., Зеленовський В. А. Вплив складу бетону на корозійний стан арматури та довговічність залізобетонних конструкцій // Автошляховик України. 2019. Вип. 1 (257). С. 33–39.
81. Бліхарський З. Я., Хміль Р. Є., Струк Р. Ф. Вплив карбонізації бетону на передумови корозії арматури залізобетонних конструкцій автодорожнього комплексу

// Дороги і мости. 2006. Вип. 6. С. 229–238. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim_2006_6_22.

82. Парнета Б. З. Корозійна стійкість залізобетонних конструкцій у заволожених та засолених середовищах : дис. канд. техн. наук : 05.23.01. Київ, 2009. 192 с.

83. Клименко Є. В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд : навч. посіб. Київ : Центр навчальної літератури, 2004. 304 с.

84. Пшінько О. М., Краснюк А. В., Пунагін В. В., Громова О. В. Будівельне матеріалознавство на транспорті. Дніпро : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. 624 с.

85. Choi S., Yang E. I. Effect of calcium leaching on the pore structure, strength, and chloride penetration resistance in concrete specimens // Nuclear Engineering and Design. 2013. Vol. 259. P. 126–136.

86. Carde R., François R. Modelling the loss of strength and porosity increase due to the leaching of cement pastes // Cement and Concrete Composites. 1999. Vol. 21, No. 3. P. 181–188.

87. Соломка В. І. Хімічна та біологічна корозія бетону і її наслідки для залізобетонних конструкцій мостів // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2013. Вип. 4. С. 107–112. DOI: 10.15802/bttrp2013/26661.

88. Lines S. J., Rothstein D. A., Rollins B., Alt C. Microbially Induced Corrosion of Concrete // International Concrete Abstracts Portal. 2021. Vol. 43, No. 5. P. 28–32.

89. Scrivener K., De Belie N. Bacteriogenic sulfuric acid attack of cementitious materials in sewage systems // In: Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments. RILEM State of the Art Report. Springer, 2013. P. 305–318.

90. Alexander M., Fourie C. Performance of sewer pipe concrete mixtures with portland and calcium aluminate cements subject to mineral and biogenic acid attack // Materials and Structures. 2011. Vol. 44. P. 313–330.

91. Wei S., Jiang Z., Liu H., Zhou D., Sanchez-Silva M. Microbiologically induced deterioration of concrete: a review // Brazilian Journal of Microbiology. 2013. Vol. 44. P. 1001–1007. DOI: 10.1590/S1517-83822014005000006.

92. Liu Y. W., Pan H. H., Chang C. S. Solid-particle abrasion of hydraulic concrete // In: 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. RILEM Publications SARL, 2006.
93. Scott B. D., Safiuddin M. Abrasion Resistance of Concrete-Design, Construction and Case Study // Concrete Research Letters. 2015. Vol. 6, No. 3.
94. Rong X. L., Li L., Zhang S., Wang F., Huang W., Zhang Y., Lu D. Freeze–thaw damage model for concrete considering a nonuniform temperature field // Journal of Building Engineering. 2023. Article No. 106747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106747>.
95. He X. P., Gao Y., Shi Y. J., Wang Y. Q., Lu K. Analyses of Temperature Loads' and Support Settlements' Effect on Load Bearing Capacity of Arch-Reticulated Shell Hybrid Steel Structure of Beijing Jiangtai Winter Garden // Advanced Materials Research. 2011. Vols. 243–249. P. 879–884. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.243-249.879>.
96. Ulewicz R., Kleszcz D., Ulewicz M. Implementation of Lean Instruments in Ceramics Industries // Management Systems in Production Engineering. 2021. Vol. 29. P. 203–207.
97. Klimecka-Tatar D., Ingaldi M. Assessment of the Technological Position of a Selected Enterprise in the Metallurgical Industry // Materials Research Proceedings. 2020. Vol. 17. P. 72–78.
98. Blikharskyy Y., Selejdak J., Kopiika N., Vashkevych R. Study of concrete under combined action of aggressive environment and long-term loading // Materials. 2021. Vol. 14, No. 21. Article No. 6612. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14216612>.
99. Lipinski T. Corrosion of the 1.4362 Duplex Stainless Steel in a Nitric Acid Environment at 333 K // Acta Physica Polonica A. 2019. Vol. 135. P. 203–206.
100. Yogalakshmi N. J., Rao K. B., Anoop M. B. Durability-Based Service Life Design of RC Structures-Chloride-Induced Corrosion // In: Reliability, Safety and Hazard Assessment for Risk-Based Technologies. Eds.: Varde P., Prakash R., Vinod G. Singapore : Springer, 2020. (Lecture Notes in Mechanical Engineering). P. 579–590.

101. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С., Солодкий С. Й., Іваницька Л. М. Дослідження впливу корозії арматури на напружено-деформований стан залізобетонних елементів // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2021. Вип. 39. С. 38–46.
102. Клим А. Б., Бліхарський Я. З., Бобало Т. В. Розрахунок несучої здатності залізобетонної балки за наявності пошкодження стиснутої зони бетону // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2023. Вип. 43. С. 149–157.
103. Клименко Є. В., Полянський К. В. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних балок // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2019. Вип. 76. С. 24–30.
104. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби. [Чинні від 2010-03-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2009. 71 с.
105. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. [Чинні від 2010-03-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 44 с.
106. ДСТУ Б В.2.5-51:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Ланки залізобетонні водопропускних труб під насипи автомобільних і залізничних шляхів. Загальні технічні умови (ГОСТ 24547-81, MOD). [Чинні від 2012-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2010. 26 с.
107. ДСТУ-Н Б В.2.3-34:2016. Настанова з виконання робіт при будівництві мостів та труб. [Чинні від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2016. 60 с.
108. EN 1916:2002 Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced.
109. ASTM C497-20e1 Standard Test Methods for Concrete Pipe, Concrete Box Sections, Manhole Sections, or Tile.
110. Heger F. G., McGrath T. J. Crack Width Control on Pipe and Box Sections // Journal of the American Concrete Institute. 1984. Vol. 81, No. 2.
111. Heger F. G., McGrath T. J. Radial Tension Strength of Pipe and Other Curved Flexural Members // Journal of the American Concrete Institute. 1983. Vol. 80, No. 1.

112. Heger F. G., McGrath T. J. Shear Strength of Pipe and Box Sections // Journal of the American Concrete Institute. 1982. Vol. 79, No. 6
113. Heger F. G., McGrath T. J. Design Method for Reinforced Concrete Pipe and Box Sections. Vienna, VA: American Concrete Pipe Association, 1982
114. Heger F. J. New Installation Designs for Buried Concrete Pipe. New York, N.Y., 1988.
115. Kolisoja P., Kalliainen A. Modelling of plastic culvert and road embankment interaction in 3D // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. P. 427–434.
116. Служба відновлення та розвитку інфраструктури у Волинській області URL: <https://www.facebook.com/vl.ukravtodor/posts/1619488511721992> (дата звернення: 25.02.2024).
117. Пшінько О. М. Систематизація дефектів залізобетонних штучних споруд та способів їх усунення // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2008. Вип. 22. С. 106–113.
118. Chennareddy, Rahulreddy. Retrofit of Corroded Metal Culverts Using GFRP Slip-Liner, The University of New Mexico, 2019
119. CLW Solutions. HDPE Slip-liners. 2019. URL: <http://www.clwsi.com/services/trenchless-technologies/slip-lining/> (дата звернення: 25.09.2022).
120. Program, N.C.H.R., Culvert Rehabilitation to Maximize Service Life while Minimizing Direct Costs and Traffic Disruption. Vol. Project Number 14-19. 2010, Transportation Research Board: Government Printing Office.
121. Technology, U.S.f.T. Cured in Place Pipe Lining. 2019. URL: <http://www.ukstt.org.uk/trenchless-technology/lining-techniques/cured-in-place-pipe-lining-cipp> (дата звернення: 25.09.2022).
122. Thornton C. Culvert Pipe Liner Guide and Specifications. Washington, D.C.: U.S. Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, 2005.
123. Spray-applied geopolymer liner used in large-diameter sewer pipe repair. URL: <https://www.plasticstoday.com/plastics-processing/spray-applied-geopolymer-liner-used-in-large-diameter-sewer-pipe-repair-technology> (дата звернення: 17.01.2025).

124. Najafi M. Pipe Bursting Projects. Reston: American Society of Civil Engineers, 2007.
125. Common Sewer Line Repair Methods. URL: <https://nwsewer.com/common-sewer-line-repair-methods> (дата звернення: 17.01.2025).
126. Pettersson L., Sundquist H. Design of Soil Steel Composite Bridges. Stockholm: Structural Design and Bridges, 2007. 84 p.
127. Kovalchuk V., Rybak R., Parneta B., Onyshchenko A., Kvasnytsya R. Determining patterns of the deformed state of the transport concrete pipe reinforced with a metal clamp under the action of static load // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 5, No. 7(119). P. 54–66. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265813>.
128. Tomala P. Wzmacnianie obiektów za pomocą konstrukcji z blach falistych // Materiały Budowlane. 2015. Nr 7. P. 72. DOI: 10.15199/33.2015.07.19.
129. «Сборные металлические гофрированные конструкции. Довідкові, рекламні видання та прайс-листи фірми "ViaCon Ukraine", 2023. 22 с.
130. Palka Z. Przepusty drogowe. Modernizacja starych i konstrukcja nowych przepustów drogowych na odcinku Kraków-Targowisko drogi krajowej nr 4. Inżynieria Bezwykopowa. 2005. 58 p.
131. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Обґрунтування параметрів конструкції відновлених дорожніх водопропускних труб з умови збереження необхідної водопропускної здатності // Дорожньо-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, вирішення : матеріали II міжнародної науково-практичної конференції. 2021. С. 113-117.
132. Компанія Віакон-Україна. URL: <https://www.facebook.com/profile.php?id=100057824222738> (дата звернення: 02.02.2024).
133. П-Г.1-218-113:2009. Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України. [Чинні від 2009-07-01]. Вид. офіц. Київ: Укравтодор, 2009. 65 с.
134. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І., Гаркуша І. Ю. Дослідження та аналіз технології відновлення гідротехнічних споруд транспортного

будівництва з дорожніх водопропускних труб методом гільзування // Дороги і мости. 2023. Вип. 28. С. 203–220.

135. ТТК 37641918/03450778-210:2016. Типова технологічна карта на ремонт водопропускних труб методом релайнінгу на автомобільних дорогах. [Чинні від 2016-10-01]. Вид. офіц. Київ: ДерждорНДІ, 2016. 54 с.

136. ДСТУ 9123:2021. Настанова з обстеження та випробування мостів і труб. [Чинні від 2021-09-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2021. 83 с.

137. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2007. 122 с.

138. ДСТУ EN 206:2018. Бетон. Технічні вимоги, експлуатаційні характеристики, виробництво та критерії відповідності (EN 206:2013 + A1:2016, IDT). [Чинні від 2018-11-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2018. 71 с.

139. ACI PRC-237-07 Self-Consolidating Concrete (Reapproved 2019).

140. Саницький М. А., Марущак У. Д., Кіракевич І. І., Стечишин М. С. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсноармованих цементуючих систем // Будівельні матеріали і вироби. 2015. № 1. С. 6–9.

141. ДСТУ 9208:2022. Бетони важкі. Технічні умови. [Чинні від 2023-01-09]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2022. 36 с.

142. ДСТУ Б В.2.7-47:96. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги (ГОСТ 10060.0-95). [Чинні від 1997-04-01]. Вид. офіц. Київ: Держбуд України, 1996. 14 с.

143. ДСТУ 3760:2019. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. [Чинні від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2019. 29 с.

144. Спосіб підвищення несучої здатності та довговічності дефектних залізобетонних труб : пат. 152813 Україна : F16L 9/18, F16L 7/02, F16L 55/18, E01D 22/00, E03F 3/00 / В.В. Ковальчук, Б.З. Парнета, Р.Т. Рибак. № u 2022 03685 ; заявл. 03.10.2022 ; опубл. 12.04.2023, Бюл. № 15. 5 с.

145. Rybak R., Kovalchuk V., Parneta B., Karnakov I. Investigation of Reinforced Concrete Pipe Deformability by Reinforcement Frame Under Static Loads // Blikharsky Z., Koszelnik P., Lichołai L., Nazarko P., Katunský D. (eds). Proceedings of CEE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 438. Cham: Springer, 2024. P. 351–361. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_35
146. Гаркуша М. В. Рекомендації з відновлення водопропускальних труб із застосуванням металевих гофрованих конструкцій // Дороги і мости. Київ, 2024. Вип. 30. С. 321–337.
147. Гоголь М. В. Вплив деформованого стану балки жорсткості на розподіл зусиль в системі // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2017. № 11. С. 45–47.
148. Спосіб підвищення несучої здатності бетонних труб : пат. 156692 Україна : F16L55/18, F16L9/18, F16L7/02, E03F3/00 / В.В. Ковальчук, Б.З. Парнета, Р.Т. Рибак. № у 2024 00673 ; заявл. 09.02.2024 ; опубл. 25.07.2024, Бюл. № 30. 5 с.
149. Лучко Й. Й., Назаревич Б. Л., Гайда О. М. Закриття тріщин в залізобетонних конструкціях ін'єкційними методами // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2013. Вип. 4. С. 19–25.
150. Kovalchuk V., Parneta B., Rybak R. Methodology of experimental studies of the deformed state of a concrete pipe restored polymer repair mix // Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 59. P. 360–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.051>.
151. ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. [Чинні від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. 32 с.
152. EN 1504 «Product and system for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality, control and evaluation of conformity».
153. Czarnecki L., Emons P. H. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Kraków : Polski Cement, 2002. 434 p.
154. Спосіб підвищення несучої здатності та довговічності дефектних залізобетонних труб : пат. 152813 Україна : F16L 9/18, F16L 7/02, F16L 55/18, E01D

22/00, E03F 3/00 / В.В. Ковальчук, Б.З. Парнета, Р.Т. Рибак. — № u 2022 03685 ; заявл. 03.10.2022 ; опубл. 12.04.2023, Бюл. № 15. — 5 с

155. Parneta B., Kovalchuk V., Rybak R. Methodology for evaluating the stress-strain state of strengthened concrete pipe using the finite element method with FEMAP with NX Nastran // In: EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering: Proceedings of International Scientific Conference. Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. P. 415–425.

156. Blikharsky Y., Khmil R., Katunský D., Blikharsky Z. RC beams with an early phase of reinforcement damage // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1376, No. 1. DOI 10.1088/1755-1315/1376/1/012020.

157. Blikharsky Y., Khmil R., Selejdak J., Katunský D., Blikharsky Z. RC beams with a middle phase of reinforcement damage // System Safety: Human – Technical Facility – Environment. 2024. Vol. 6, No. 1. P. 184–191. DOI: <https://doi.org/10.2478/czoto-2024-0020>.

158. Онищенко А. М., Ковальчук В. В., Федоренко О. В., Парнета Б. З., Рибак Р. Т., Парнета М. Б. Методика оцінювання теплових потоків, що діють на сталезалізобетонні мости // Промислове будівництво та інженерні споруди. 2021. № 3. С. 37–41.

159. Kovalchuk V., Onyshchenko A., Fedorenko O., Habrel M., Parneta B., Voznyak O., Markul R., Parneta M., Rybak R. A comprehensive procedure for estimating the stressed-strained state of a reinforced concrete bridge under the action of variable environmental temperatures // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 2(7(110)). P. 23–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228960

160. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинні зі зміною № 1]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2009. 72 с.

161. ДСТУ 8803:2018. Прокат товстолистовий з вуглецевої сталі звичайної якості. Технічні умови. [Чинні від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 15 с.

162. Rybak R., Kovalchuk V., Parneta B., Parneta O., Bal O., Boiarko V. Stress-strain state of reinforced concrete pipes under the influence of climatic temperature changes

in the environment // Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Collection of Scientific Works. 2022. – No. 86. P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-86-54-61>.

163. Kovalchuk V., Rybak R., Hnativ Y., Tkachenko V., Onyshchenko A., Kravets I., Hermaniuk Y., Babyak M., Hembara N., Velhan I. Assessment of the stressed-strained state of a reinforced transport pipe under the combined effect of ambient temperature and static loads // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 6, No. 7(120). P. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268904>.

164. Лучко Й. Й. Мости, труби і тунелі: За ред. д. т. н., проф. Й. Й. Лучка / Й. Й. Лучко, О. С. Распопов, П. М. Коваль / М-во освіти і науки України; Дніпропетровський нац. ун-т залізнич. транспорту ім. Акад. В. Лазаряна. – Львів: Каменяр, 2014. – 879 с.

165. Kossak O., Savula Ya. The investigation of the deformations of the elasticbodies with thin coating using D-adaptive finite element model // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. Вип. 12., 2010. С. 102–111.

166. Makar I., Savula Y., Styahar A. Numerical analysis of a multiscale model of theelastic body with the thin cover // Фіз.-мат. моделювання та інформ.технології. Вип. 1.5., 2012. С. 49–55.

167. Rybak R. Experimental testing methodology of stress-strain state of the reinforced concrete pipe with strengthening // Theory and Building Practice. 2022. Vol. 4, No. 2. P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.02.036>.

168. Kovalchuk V., Hnativ Y., Luchko Y., Sysyn M. Study of the temperature field and the thermos-elastic state of the multilayer soil-steel structure // Roads and Bridges. 19(1), 2020. P. 65–78. DOI: 10.7409/rabdim.020.004

169. Технічні характеристики ін'єкційної смоли VIMEPOX INJECT. URL: https://vimatec.com.ua/components/com_jshopping/files/demo_products/VIMEPOX_MORTAR.pdf (дата звернення: 02.06.2023).

170. Киркач Б. М., Кононов В. І., Погорілов С. Ю., Хавін В. Л., Шергін С. Ю., Автономова Л. В. Розрахунки на опір втомленості: навчально-методичний посібник з

розділу курсу «Опір матеріалів» для студентів машинобудівних спеціальностей // Харків: НТУ «ХПІ». 2012. 104 с.

171. Mel'nyk I.V. Stress-Strain State of the Fragments of Armored Monolithic Floors with Tubular Inserts // Materials Science, 52(2). 2016. P. 269-279. DOI:10.1007/s11003-016-9954-9.

172. Mel'nyk I.V. Stiffness of Monolithic Reinforced-Concrete Slab Structures // Materials Science, 55(3). 2019. P. 367-373. DOI: 10.1007/s11003-019-00311.

ДОДАТОК А

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. **Rybak R.**, Kovalchuk V., Parneta B., Parneta O., Bal O., Boiarko V. Stress-strain state of reinforced concrete pipes under the influence of climatic temperature changes in the environment // Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture : collection of scientific works. 2022. Iss. 86. P. 54–61. Odesa : OSACEA. DOI: 10.31650/2415-377X-2022-86-54-61.
2. **Rybak R.** Experimental testing methodology of stress-strain state of the reinforced concrete pipe with strengthening // Theory and Building Practice. 2022. Vol. 4, No. 2. P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.02.036>.

Статті у наукових виданнях, що включені до наукометричної бази даних SCOPUS:

3. Kovalchuk V., Onyshchenko A., Fedorenko O., Habrel M., Parneta B., Voznyak O., Markul R., Parneta M., Rybak R. A comprehensive procedure for estimating the stressed-strained state of a reinforced concrete bridge under the action of variable environmental temperatures // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 2, No. 7(110). P. 23–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228960.
4. Kovalchuk V., Koval M., Onyshchenko A., Kravets I., Bal O., Markul R., Vikhot S., Petrenko O., **Rybak R.**, Milyanych A. Determining the Strained State of Prefabricated Metal Corrugated Structures of a Tunnel Overpass Exposed to the Dynamic Loading from Railroad Rolling Stock // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 3, No. 7(117). P. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022>.
5. Kovalchuk V., **Rybak R.**, Parneta B., Onyshchenko A., Kvasnytsya R. Determining patterns of the deformed state of the transport concrete pipe reinforced with a metal clamp under the action of static load // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 5, No. 7(119). P. 54–66. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265813>.

6. Kovalchuk V., **Rybak R.**, Hnativ Y., Tkachenko V., Onyshchenko A., Kravets I., Hermaniuk Y., Babyak M., Hembara N., Velhan I. Assessment of the stressed-strained state of a reinforced transport pipe under the combined effect of ambient temperature and static loads // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 6, No. 7(120). P. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268904>.

7. **Rybak R.**, Kovalchuk V., Parneta B., Karnakov I. Investigation of Reinforced Concrete Pipe Deformability by Reinforcement Frame Under Static Loads // In: Blikharsky Z., Koszelnik P., Lichołai L., Nazarko P., Katunský D. (eds) Proceedings of CEE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering. Cham: Springer, 2024. Vol. 438. P. 351–361. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_35.

8. Kovalchuk V., Parneta B., **Rybak R.** Methodology of Experimental Studies of the Deformed State of a Concrete Pipe Restored Polymer Repair Mix // Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 59. P. 360–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.051>.

9. Parneta B., Kovalchuk V., **Rybak R.** Methodology for Evaluating the Stress-Strain State of Strengthened Concrete Pipe Using the Finite Element Method with FEMAP with NX Nastran // International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 415–425. DOI: [10.1007/978-3-031-67576-8_37](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_37).

Патенти:

10. Спосіб підвищення несучої здатності та довговічності дефектних залізобетонних труб / Ковальчук В. В., Парнета Б. З., **Рибак Р. Т.** : пат. 152813 Україна : F16L 9/18, F16L 7/02, F16L 55/18, E01D 22/00, E03F 3/00. № и 2022 03685 ; опубл. 12.04.2023, Бюл. № 15. 5 с.

11. Спосіб підвищення несучої здатності бетонних труб / Ковальчук В. В., Парнета Б. З., **Рибак Р. Т.** : пат. 156692 Україна : F16L 55/18, F16L 9/18, F16L 7/02, E03F 3/00. № и 2024 00673 ; опубл. 23.07.2024, Бюл. № 30. 5 с.

Інші публікації:

12. Онищенко А. М., Ковальчук В. В., Федоренко О. В., Парнета Б. З., **Рибак Р. Т.**, Парнета М. Б. Методика оцінювання теплових потоків, що діють на

сталезалізобетонні мости // Промислове будівництво та інженерні споруди. 2021. № 3. С. 37–41.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. **Рибак Р. Т.** Дослідження термонапруженого стану залізобетонної труби підсиленої металевою гофрованою конструкцією // 78-ма Студентська науково-технічна конференція : зб. тез доп. Вип. за жовтень 2020 р. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. С. 35–37 (дистанційна форма участі).

14. Парнета М. Б., **Рибак Р. Т.**, Парнета О. Б. Особливості виготовлення бетонів для підвищення медійності будівель та споруд // IX Міжнар. наук.-практ. конф. "EURASIAN SCIENTIFIC DISCUSSIONS", 25–27 верес. 2022 р., Барселона, Іспанія. World of Conferences. Proceedings. Барселона, 2022. С. 84–86 (дистанційна форма участі).

15. **Rybak R.**, Parneta O. Reasoning of the methodology for evaluating the effectiveness of strengthening reinforced concrete pipes // III International Scientific Conference "Scientific advances and innovative approaches", 23–24 February 2023, Tokyo, Japan. World of Conferences. Tokyo, 2023. P. 83–85 (дистанційна форма участі).

16. Парнета Б. З., **Рибак Р. Т.** Оцінювання впливу каркасного армування бетонної труби на деформативність при дії статичних навантажень // Концептуальні проблеми розвитку сучасної гуманітарної та прикладної науки : матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. симп., 9 трав. 2024 р., Івано-Франківськ, 2024. С. 160–163 (дистанційна форма участі).

ДОДАТОК Б
АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО
ДОСЛІДЖЕННЯ

**ТзОВ „Фірма ІНТЕРБУД”**

р/р 2600730364401 в АБ «Кредит-Дніпро»

МФО 305749, ЗКПО 35774634

79054, м. Львів, вул. Єфремова 35

тел.: (032) 237 72 04, факс: (032) 237 97 94

№18/02/2025

від 18 лютого 2025р.

ДОВІДКА**про впровадження результатів науково-дослідної роботи**

Результати дисертаційних досліджень Рибак Роман Тарасовича за темою «Напружено-деформований стан підсилених залізобетонних труб за дії змінних навантажень» були застосовані у наступних проектах:

1. Нове будівництво багатоквартирних житлових будинків з вбудовано прибудованими приміщеннями громадського призначення по вул. Драгоманова, 19а у м. Володимирі-Волинському Волинської області (Відновлення залізобетонної водопропускної труби);
2. Будівництво Головним управлінням Національної поліції у Львівській області адміністративного центру швидкого реагування поліції на вул. Стрийській (біля будинку №105) у м. Львові (Підсилення бетонної водопропускної труби);
3. Проведення аварійно-відновлювальних робіт із ліквідації аварійного стану житлового будинку №18 на вул. Бр. Міхновських, у м. Львові постаждалого внаслідок ракетного удару зі сторони країни-агресора російської федерації 04.09.2024 р., (Підсилення бетонного каналізаційного колектора)

Дані наукові дослідження по розробці способів підсилення труб, є актуальними та мають значне практичне застосування, оскільки підсилення та відновлення водопропускних труб є актуальною інженерною задачею.

Директор



Ростислав БУРАК



Вих. №10/03
від 10 березня 2025 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Результати дисертаційного дослідження Рибак Роман Тарасовича на тему «Напружено-деформований стан підсилених залізобетонних труб за дії змінних навантажень» були впроваджені у наступних проектах:

1. Підсилення залізобетонної труби розміром 3 м х 2 м, шляхом гільзування, використовуючи спіральню виту оцинковану гофровану трубу НСПА 16. Вільний простір між стінками гофрованої труби і стінками залізобетонної труби був заповнений монолітним бетоном В – 15. Підсилення труби виконувалося при реконструкції автомобільної дороги Н -23 Кропивницький – Кривий Ріг – Запоріжжя на ділянці км 76+100 – км 81+885 в 2021 р.

2. Підсилення залізобетонної труби розміром 3 м х 2,5 м, шляхом гільзування, використовуючи збірну металеву гофровану оцинковану трубу. Вільний простір між стінками гофрованої труби і стінками залізобетонної труби був заповнений монолітним бетоном В – 15. Підсилення труби виконувалося при Капітальному ремонті автомобільної дороги державного значення М-12 Стрий - Тернопіль - Кропивницький - Знам'янка (через м. Вінницю) на ділянці км 707+714 - км 714+545 в 2020 р.

Виконані роботи підтвердили ефективність запропонованих способів підсилення та їх доцільність для застосування в умовах експлуатації транспортних споруд.

Головний інженер «ВІАКОН УКРАЇНА»



Вадим ГЕВЧУК

ТОВ ВІАКОН УКРАЇНА

Україна, 03191, м.Київ, вул. Ан. Зіньківського, 4 тел/факс +380 44 426 39 58,
Код 34422841, ІПН 344228426506, Р/Р UA18 325365 000000 26007017447 64 в АТ «КРЕДОБАЧК» м. Київ,
info@viacon.ua www.viacon.ua



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор
з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
доцент Олег ДАВИДЧАК
«__» _____ 2024 р.

АКТ

про використання у навчальному процесі кафедри будівельного виробництва матеріалів і результатів дисертаційної роботи Рибак Роман Тарасовича «Напружено-деформований стан підсилених залізобетонних труб при дії змінних навантажень і впливів»

Нами, головою науково-методичної ради Інституту будівництва та інженерних систем, к.т.н., доцентом Позняк О.Р., завідувачем кафедри будівельного виробництва, д.т.н., професором Саницьким М.А. складено даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Рибак Р.Т. впроваджені в навчальний процес на кафедрі будівельного виробництва, зокрема:

- в дисципліні «Утримання міської забудови», що викладається для студентів першого рівня вищої освіти за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, вибірковий блок «Міське будівництво та господарство» (розділ «Прокладка підземних інженерних мереж на території мікрорайонів.»);
- в дисципліні «Утримання та використання міської забудови», що викладається для студентів другого рівня вищої освіти спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія освітньо-професійної програми «Міське будівництво та господарство» (розділ «Інженерний благоустрій при реконструкції міста.»);
- в дипломному проектуванні студентів кафедри будівельного виробництва першого та другого рівнів вищої освіти.

Голова НМР ІБІС
к.т.н., доцент

Оксана ПОЗНЯК

Завідувач кафедри будівельного
виробництва, д.т.н., професор

Мирослав САНИЦЬКИЙ



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор

з науково-педагогічної роботи

Національного університету

«Львівська політехніка»

доцент Олег ДАВИДЧАК

«__» _____ 2024 р.

АКТ

про використання у навчальному процесі кафедри транспортних технологій матеріалів і результатів дисертаційної роботи Рибак Роман Тарасовича «Напружено-деформований стан підсилених залізобетонних труб при дії змінних навантажень і впливів»

Результати дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії Рибак Роман Тарасовича впровадженні в навчальний процес з підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)», спеціалізацій 275.02 «Транспортні технології (на залізничному транспорті)» та 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)», які навчаються за освітніми програмами «Організація перевезень та управління на залізничному транспорті» та «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» у таких навчальних дисциплінах:

1. «Загальний курс транспорту» – використані матеріали, які містять пропонувані способи підвищення несучої здатності транспортних споруд (Тема 1 – «Проектування поперечного профілю дороги», Тема 2 – «Проектування поздовжнього профілю дороги»);

2. «Транспортні засоби та інфраструктура залізниць» – використані матеріали щодо експлуатації та способів підсилення труб на залізничних шляхах сполучення (Тема 1 – «Загальні відомості про інженерні споруди транспорту. Служба експлуатації мостів та їх моніторинг», Тема 3 – «Конструкції, проектування та будівництво труб. Підпірні стінки та шумозахисні споруди на залізницях.»).

Завідувач кафедри
транспортних технологій,
Голова методичної комісії спеціальності
275 «Транспортні технології (за видами)»
канд. техн. наук, доцент

Юрій РОЙКО

ДОДАТОК В
ЛОКАЛЬНІ КОШТОРИСИ НА БУДІВЕЛЬНІ РОБОТИ

ДОДАТОК В.1

Ремонт ділянки дороги з зруйнованою колекторною залізобетонною трубою для проходження стоків з заміною залізобетонної труби

Локальний кошторис на будівельні роботи №06-01-01

на ремонт дороги з заміною залізобетонної труби

Ремонт ділянки дороги з зруйнованою колекторною залізобетонною трубою для проходження стоків з заміною залізобетонної труби

Основа:

Кошторисна вартість

356,674 тис. грн.

креслення (специфікації) №

Кошторисна трудомісткість

0,49427 тис.люд.год.

Кошторисна заробітна плата

61,738 тис. грн.

Середній розряд робіт

3,7 розряд

Складений за поточними цінами станом на "26 лютого" 2025 р.

№ Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										тих, що обслуговують машини	
										на одиницю	всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Розділ 1. Демонтаж дорожнього полотна											
1	KP18-4-1	Знімання асфальтобетонних покриттів доріг за допомогою машин для холодного фрезерування асфальтобетонних покриттів окремими місцями площею до 10 м2 шириною фрезерування 500 мм та глибиною фрезерування 50 мм	100м2	0,0324	<u>16585,66</u> 1221,13	<u>15321,64</u> 4182,01	537	40	<u>496</u> 135	<u>13,2000</u> 30,8573	<u>0,43</u> 1
2	KP18-4-2	На кожні 10 мм зміни глибини фрезерування додавати або виключати до норми 18-4-1	100м2	0,0324	<u>2596,92</u> 188,72	<u>2401,96</u> 655,68	84	6	<u>78</u> 21	<u>2,0400</u> 4,8510	<u>0,07</u> 0,16
3	KP1-6-1	Навантаження знятого асфальтобетону на автомобілі-самоскиди	100 м3	0,012	<u>20381,80</u> 20381,80	<u>-</u> -	245	245	<u>-</u> -	<u>220,3200</u> -	<u>2,64</u> -
4	KP18-1-4	Розбирання чорних щебеневих покриттів та основ	100м3	0,0192	<u>12988,18</u> 3126,10	<u>9862,08</u> 2225,34	249	60	<u>189</u> 43	<u>33,7920</u> 15,8288	<u>0,65</u> 0,3
5	KP18-1-3	Розбирання щебеневих покриттів та піщаних покриттів та основ	100м3	0,0776	<u>9551,77</u> 2877,43	<u>6674,34</u> 1468,66	741	223	<u>518</u> 114	<u>31,1040</u> 10,3249	<u>2,41</u> 0,8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	КР1-9-11	Розробка ґрунту в траншеях та котлованах екскаваторами місткістю ковша 0,25 м3 з навантаженням на автомобілі-самоскиди, група ґрунту 3	100 м3	0,525	<u>14715,90</u> 830,68	<u>13876,76</u> 4495,28	7726	436	<u>7285</u> 2360	<u>8,8080</u> 36,6138	<u>4,62</u> 19,22
		Разом прямі витрати по розділу 1					9582	1010	<u>8566</u> 2673		<u>10,82</u> 21,48
		Разом будівельні роботи, грн. в тому числі: вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн. всього заробітна плата, грн. Загальновиробничі витрати, грн. трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год. заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн. Всього будівельні роботи, грн. Всього по розділу 1					9582 6 3683 1950 3,88 689 11532 11532				
		Розділ 2. Демонтаж та заміна з/б труби									
7	КБ30-65-3 к дем.=0,8	Демонтаж круглих залізобетонних водопропускних труб отвором 1 м при висоті насипу на залізницях до 3 м, на автомобільних дорогах до 4 м	м3	4,84	<u>3542,09</u> 1352,29	<u>2187,60</u> 892,05	17144	6545	<u>10588</u> 4318	<u>12,4992</u> 6,1440	<u>60,5</u> 29,74
8	КБ30-64-2 к дем.=0,8	Демонтаж лекальних блоків під ланки круглих залізобетонних водопропускних труб	м3	1,48	<u>879,17</u> 250,23	<u>628,94</u> 256,46	1301	370	<u>931</u> 380	<u>2,3712</u> 1,7664	<u>3,51</u> 2,61
9	КБ30-15-2	Розбирання залізобетонної кладки оголовків	100 м3	0,0192	<u>1540452,1</u> 0 577932,85	<u>956746,85</u> 320440,41	29577	11096	<u>18370</u> 6152	<u>4819,3200</u> 2862,8942	<u>92,53</u> 54,97
10	КБ30-64-1	Укладання лекальних блоків під ланки круглих залізобетонних водопропускних труб отвором до 1 м	м3	1,48	<u>17442,85</u> 405,24	<u>1025,44</u> 418,15	25815	600	<u>1518</u> 619	<u>3,8400</u> 2,8800	<u>5,68</u> 4,26
11	КБ30-65-3	Укладання ланок одноочкових круглих залізобетонних водопропускних труб отвором 1 м при висоті насипу на залізницях до 3 м, на автомобільних дорогах до 4 м	м3	4,22	<u>5658,97</u> 1690,36	<u>2734,50</u> 1115,06	23881	7133	<u>11540</u> 4706	<u>15,6240</u> 7,6800	<u>65,93</u> 32,41
12	С1416-8462	Ланки водопропускних труб (циліндричні)(конічні), діаметр отвору 1,0 м, гранична висота засипання до 4 м	м	10	<u>5579,48</u> -	<u>-</u> -	55795	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	КБ30-73-3	Будівництво оголовків одночкових круглих труб отвором 1-2 м	м3	1,92	<u>22412,65</u> 597,21	<u>863,08</u> 351,94	43032	1147	<u>1657</u> 676	<u>5,5200</u> 2,4240	<u>10,6</u> 4,65
		Разом прямі витрати по розділу 2					196545	26891	44604 16851		238,75 128,64
		Разом будівельні роботи, грн.					196545				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					125050				
		всього заробітна плата, грн.					43742				
		Загальновиробничі витрати, грн.					25128				
		трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.					50,55				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					8987				
		Всього будівельні роботи, грн.					221673				
		Всього по розділу 2					221673				
Розділ 3. Відновлення дорожнього полотна											
14	КБ1-27-3	Засипка траншей і котлованів бульдозерами з переміщенням ґрунту до 5 м, група ґрунтів 3	1000м3	0,0528	<u>11476,86</u> -	<u>11476,86</u> 3144,04	606	-	606 166	- 24,7835	- 1,31
15	КБ1-13-3	Насув ґрунту екскаваторами з ковшом місткістю 0,4 [0,3-0,45] м3, група ґрунтів 3	1000м3	0,028	<u>45495,84</u> 1827,26	<u>43668,58</u> 15898,85	1274	51	<u>1223</u> 445	<u>19,7520</u> 121,9553	<u>0,55</u> 3,41
16	КБ1-90-2	Ремонтне планування вручну насипного ґрунту узбіччя, група ґрунтів 2	1000м2	0,028	<u>25620,49</u> 25620,49	- -	717	717	- -	<u>252,1950</u> -	<u>7,06</u> -
17	ДБ1-6-5	Ущільнення ґрунту вручну на укосах не крутіше 1:4 і місць, стиснутих розпірками: товщина шару понад 0,2 м до 0,3 м, ґрунт I, II групи	100 м2	0,48	<u>1205,59</u> 1205,59	- -	579	579	- -	<u>13,0320</u> -	<u>6,26</u> -
18	ДБ1-17-3	Планування укосів бульдозером обладнаним укісником при робочому ході в двох напрямках, ширина укосу 2 м	1000 м2	0,028	<u>1749,63</u> -	<u>1749,63</u> 390,89	49	-	49 11	- 2,6136	- 0,07
19	КБ27-13-1	Улаштування одношарової основи зі щебеню за товщини 15 см	1000м2	0,0324	<u>380766,60</u> 3799,40	<u>21444,34</u> 5184,19	12337	123	695 168	<u>38,4360</u> 36,9460	<u>1,25</u> 1,2
20	КБ27-13-4	Улаштування основи зі щебеню, за зміни товщини на кожен 1 см додавати або вилучати до/з норм 27-13-1 - 27-13-3	1000м2	0,0324	<u>22384,44</u> -	<u>414,21</u> 82,91	725	-	13 3	- 0,6490	- 0,02
21	КБ27-17-1	Улаштування основи із щебенево-піщаної суміші за товщини шару 12 см	100м2	0,324	<u>19878,69</u> 3019,50	<u>1236,40</u> 428,31	6441	978	401 139	<u>30,0000</u> 3,3252	<u>9,72</u> 1,08

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
22	КБ27-23-1	Улаштування чорнощобенових основ методом напівпросочування за товщини 5 см	1000м2	0,0324	<u>371350,62</u> 1972,65	<u>9085,15</u> 2403,20	12032	64	<u>294</u> 78	<u>19,9560</u> 18,0379	<u>0,65</u> 0,58
23	КБ27-23-2	Улаштування чорнощобенових основ методом напівпросочування, за зміні товщини основи на 1 см додавати або вилучати до/з норми 27-23-1	1000м2	0,0324	<u>71310,50</u> -	<u>567,72</u> 153,39	2310	-	<u>18</u> 5	<u>-</u> 1,2791	<u>-</u> 0,04
24	КБ27-26-1	Улаштування нижнього шару покриття за товщини 10 см з асфальтобетонних сумішей асфальтоукладальником за ширини укладання 7 м	1000 м2	0,0324	<u>1695479,8</u> 9 1918,54	<u>16259,85</u> 3027,11	54934	62	<u>527</u> 98	<u>18,1800</u> 20,5849	<u>0,59</u> 0,67
25	КБ27-27-1	Улаштування верхнього шару покриття товщиною 5 см з асфальтобетонних сумішей асфальтоукладальником за ширини укладання 7 м	1000 м2	0,0324	<u>903382,42</u> 1767,84	<u>14591,07</u> 2618,74	29270	57	<u>473</u> 85	<u>16,7520</u> 17,8079	<u>0,54</u> 0,58
		Разом прямі витрати по розділу 3					121274	2631	<u>4299</u> 1198		<u>26,62</u> 8,96
		Разом будівельні роботи, грн.					121274				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					114344				
		всього заробітна плата, грн.					3829				
		Загальновиробничі витрати, грн.					2193				
		трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.					4,57				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					808				
		Всього будівельні роботи, грн.					123467				

		Всього по розділу 3					123467				
		Разом прямі витрати по кошторису					327401	30532	<u>57469</u> 20722		<u>276,19</u> 159,08
		Разом будівельні роботи, грн.					327401				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					239400				
		всього заробітна плата, грн.					51254				
		Загальновиробничі витрати, грн.					29273				
		трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.					59				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					10484				
		Всього будівельні роботи, грн.					356674				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

		Всього по кошторису					356674				
		Кошторисна трудомісткість, люд.год.					494,27				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					61738				

Склав

[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Перевірів

[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

ДОДАТОК В.2

Ремонт ділянки дороги з зруйнованою колекторною залізобетонною трубою для проходження стоків з підсиленням залізобетонної труби

**Локальний кошторис на будівельні роботи №06-01-01
на ремонт дороги з підсиленням залізобетонної труби**

Ремонт ділянки дороги з зруйнованою колекторною залізобетонною трубою для проходження стоків з підсиленням залізобетонної труби

Основа:
креслення (специфікації) №

Кошторисна вартість 278,875 тис. грн.
Кошторисна трудомісткість 0,52178 тис.люд.год.
Кошторисна заробітна плата 61,489 тис. грн.
Середній розряд робіт 3,4 розряд

Складений за поточними цінами станом на "26 лютого" 2025 р.

№ Ч.ч.	Обґрунту- вання (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кіль- кість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуа- тації машин	Всього	заробіт- ної плати	експлуа- тації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										тих, що обслуговують машини	
					заробіт- ної плати	в тому числі за- робітної плати			в тому числі за- робітної плати	на одини- цю	всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ДЕ1-7-2	Розробка ґрунту у відвал екскаватором New Holland MH CITY з ковшем місткістю 0,65 м3, ґрунт 2 групи	1000 м3	0,0032	<u>17448,96</u>	<u>17448,96</u>	56	-	<u>56</u>	-	-
					-	5875,27			19	38,7072	0,12
2	КБ1-164-1	Розробка ґрунту вручну в траншеях глибиною до 2 м без кріплень з укосами, група ґрунтів 1	100м3	0,016	<u>21775,53</u>	-	348	348	-	<u>240,7200</u>	<u>3,85</u>
					21775,53	-			-	-	-
3	СП5-1-1	Гідроструменеве очищення бетонних поверхонь за допомогою причіпної установки для очищення поверхонь під тиском типу "Торбокар АС-52"	100 м2	0,314	<u>29933,07</u>	<u>22930,10</u>	9399	2199	<u>7200</u>	<u>66,3600</u>	<u>20,84</u>
					7002,97	3134,94			984	23,7336	7,45
4	КБ30-72-1	Укладання водопропускних труб з гофрованого металу типу HELCOR	м	10	<u>19496,84</u>	<u>914,35</u>	194968	31055	<u>9144</u>	<u>28,7040</u>	<u>287,04</u>
					3105,49	372,85			3729	2,5680	25,68
5	КБ6-16-1	Улаштування бетоної суміші бетононасосами, товщиною до 50 мм	100м3	0,03	<u>1141273,5</u>	<u>63344,77</u>	34238	10308	<u>1900</u>	<u>3255,8280</u>	<u>97,67</u>
					343587,53	30123,85			904	234,5606	7,04
6	КБ30-73-3	Будівництво оголовків одноочкових круглих труб отвором 1-2 м	м3	0,72	<u>14252,31</u>	<u>863,08</u>	10262	430	<u>621</u>	<u>5,5200</u>	<u>3,97</u>
					597,21	351,94			253	2,4240	1,75

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	КБ1-90-2 к=1,15	Ремонтне планування вручну насипного грунту узбіччя, група ґрунтів 2	1000м2	0,028	<u>25620,49</u> 25620,49	<u>-</u> -	717	717	<u>-</u> -	<u>252,1950</u> -	<u>7,06</u> -
		Разом прямі витрати по кошторису					249988	45057	<u>18921</u> 5889		<u>420,43</u> 42,04
		Разом будівельні роботи, грн.					249988				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					186010				
		всього заробітна плата, грн.					50946				
		Загальновиробничі витрати, грн.					28887				
		трудоємність в загальновиробничих витратах, люд.год.					59,31				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					10543				
		Всього будівельні роботи, грн.					278875				

		Всього по кошторису					278875				
		Кошторисна трудоємність, люд.год.					521,78				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					61489				

Склав _____
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Перевірив _____
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

ДОДАТОК В.3

Ремонт ділянки дороги з зруйнованою колекторною залізобетонною трубою для проходження стоків з підсиленням залізобетонної труби армокаркасом Д2025

Локальний кошторис на будівельні роботи №06-01-01
на ремонт дороги з підсиленням залізобетонної труби армокаркасом
Ремонт ділянки дороги з зруйнованою колекторною залізобетонною трубою для проходження стоків з підсиленням залізобетонної труби армокаркасом

Основа:	Кошторисна вартість	280,940 тис. грн.
креслення (специфікації) №	Кошторисна трудомісткість	0,5242 тис.люд.год.
	Кошторисна заробітна плата	61,781 тис. грн.
	Середній розряд робіт	3,4 розряд

Складений за поточними цінами станом на “26 лютого” 2025 р.

№ Ч.ч. ·	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										тих, що обслуговують машини	
										на одиницю	всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ДЕ1-7-2	Розробка ґрунту у відвал екскаватором New Holland MH CITY з ковшем місткістю 0,65 м3, ґрунт 2 групи	1000 м3	0,0032	<u>17448,96</u>	<u>17448,96</u>	56	-	<u>56</u>	-	-
					-	5875,27			19	38,7072	0,12
2	КБ1-164-1	Розробка ґрунту вручну в траншеях глибиною до 2 м без кріплень з укусами, група ґрунтів 1	100м3	0,016	<u>21775,53</u>	-	348	348	-	<u>240,7200</u>	<u>3,85</u>
					21775,53	-			-	-	-
3	СЛ5-1-1	Гідроструменеве очищення бетонних поверхонь за допомогою причіпної установки для очищення поверхонь під тиском типу "Торбокар АС-52"	100 м2	0,314	<u>29933,07</u>	<u>22930,10</u>	9399	2199	<u>7200</u>	<u>66,3600</u>	<u>20,84</u>
					7002,97	3134,94			984	23,7336	7,45
4	КБ30-72-1	Укладання водопропускних труб з гофрованого металу типу HELCOR	м	10	<u>19496,84</u>	<u>914,35</u>	194968	31055	<u>9144</u>	<u>28,7040</u>	<u>287,04</u>
					3105,49	372,85			3729	2,5680	25,68
5	КБ5-75-5	Виготовлення арматурних каркасів	т	0,047	<u>36930,49</u>	-	1736	97	-	<u>21,5640</u>	<u>1,01</u>
					2053,97	-			-	-	-
6	КБ37-17-1	Установлення армокаркасів	100т	0,00047	<u>434877,02</u>	<u>163082,01</u>	204	128	<u>76</u>	<u>2142,4800</u>	<u>1,01</u>
					271795,01	53652,30			25	371,7600	0,17

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	КБ6-16-1	Улаштування бетоної суміші бетононасосами, товщиною до 50 мм	100м3	0,03	<u>1141273,5</u> 7 343587,53	<u>63344,77</u> 30123,85	34238	10308	<u>1900</u> 904	<u>3255,8280</u> 234,5606	<u>97,67</u> 7,04
8	КБ30-73-3	Будівництво оголовків одноочкових круглих труб отвором 1-2 м	м3	0,72	<u>14252,31</u> 597,21	<u>863,08</u> 351,94	10262	430	<u>621</u> 253	<u>5,5200</u> 2,4240	<u>3,97</u> 1,75
9	КБ1-90-2 к=1,15	Ремонтне планування вручну насипного грунту узбіччя, група ґрунтів 2	1000м2	0,028	<u>25620,49</u> 25620,49	<u>-</u> -	717	717	<u>-</u> -	<u>252,1950</u> -	<u>7,06</u> -
		Разом прямі витрати по кошторису					251928	45282	<u>18997</u> 5914		<u>422,45</u> 42,21
		Разом будівельні роботи, грн. в тому числі: вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн. всього заробітна плата, грн. Загальновиробничі витрати, грн. трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год. заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн. Всього будівельні роботи, грн.					251928 187649 51196 29012 59,54 10585 280940				

		Всього по кошторису					280940				
		Кошторисна трудомісткість, люд.год. Кошторисна заробітна плата, грн.					524,2 61781				

Склав _____
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Перевірив _____
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Ремонт ділянки дороги з зруйнованою колекторною залізобетонною трубою для проходження стоків методом інектування
Д2025

Локальний кошторис на будівельні роботи №06-01-01
на ремонт дороги з підсиленням залізобетонної труби методом інектування
Ремонт ділянки дороги з зруйнованою колекторною залізобетонною трубою для проходження стоків методом інектування

Основа:	Кошторисна вартість	232,469 тис. грн.
креслення (специфікації) №	Кошторисна трудомісткість	0,15841 тис.люд.год.
	Кошторисна заробітна плата	19,247 тис. грн.
	Середній розряд робіт	4,0 розряд

Складений за поточними цінами станом на “26 лютого” 2025 р.

№ ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										тих, що обслуговують машини	
										на одиницю	всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ДЕ1-7-2	Розробка ґрунту у відвал екскаватором New Holland MH CITY з ковшем місткістю 0,65 м3, ґрунт 2 групи	1000 м3	0,0032	<u>17448,96</u> -	<u>17448,96</u> 5875,27	56	-	<u>56</u> 19	- 38,7072	- 0,12
2	КБ1-164-1	Розробка ґрунту вручну в траншеях глибиною до 2 м без кріплень з укусами, група ґрунтів 1	100м3	0,016	<u>21775,53</u> 21775,53	- -	348	348	- -	<u>240,7200</u> -	<u>3,85</u> -
3	СЛ5-1-1	Гідроструменеве очищення бетонних поверхонь за допомогою причіпної установки для очищення поверхонь під тиском типу "Торбокар АС-52"	100 м2	0,314	<u>38846,76</u> 7002,97	<u>31605,92</u> 6543,95	12198	2199	<u>9924</u> 2055	<u>66,3600</u> 51,0691	<u>20,84</u> 16,04
4	ГМ1-1-5	Гідроізоляція холодних швів, тріщин, примикань в радіальних бетонних та залізобетонних конструкціях ін'єктуванням двокомпонентних поліуретанових смол без фільтрації води	1 м	20	<u>10529,28</u> 538,28	<u>51,57</u> 6,31	210586	10766	<u>1031</u> 126	<u>4,6240</u> 0,0528	<u>92,48</u> 1,06
5	КБ1-90-2 к=1,15	Ремонтне планування вручну насипного ґрунту узбіччя, група ґрунтів 2	1000м2	0,028	<u>25620,49</u> 25620,49	- -	717	717	- -	<u>252,1950</u> -	<u>7,06</u> -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Разом прямі витрати по кошторису					223905	14030	<u>11011</u> 2200		<u>124,23</u> 17,22
		Разом будівельні роботи, грн.					223905				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					198864				
		всього заробітна плата, грн.					16230				
		Загальновиробничі витрати, грн.					8564				
		трудоємність в загальновиробничих витратах, люд.год.					16,96				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					3017				
		Всього будівельні роботи, грн.					232469				

		Всього по кошторису					232469				
		Кошторисна трудоємність, люд.год.					158,41				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					19247				

Склав

[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Перевірив

[посада, підпис (ініціали, прізвище)]