

УДК 624.1:625.1:519.6

**ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ
МЕТАЛОІН'ЄКЦІЙНИХ СОРОЧОК ОПРАВ ПІДЗЕМНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ СПОРУД**

Асп. Є. А. Проказа, д-р техн. наук А. А. Плугін,
кандидати техн. наук Д. А. Фаст, О. О. Овчинніков, д-р філ. Н. О. Муригіна

**VERIFICATION OF FINITE ELEMENT ANALYSIS RESULTS FOR METAL-INJECTED
JACKETS OF UNDERGROUND RAILWAY STRUCTURE LININGS**

Postgraduate student Ye. A. Prokaza, D-r. Sc. (Tech.) A. A. Plugin,
PhD (Tech.) D. A. Fast, PhD (Tech.) O. O. Ovchynnikov, PhD N. O. Murygina

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362753>



Анотація. Інженерні споруди на залізницях – мости, водопропускні труби, тунелі – є відповідальними об'єктами з тривалими строками експлуатації. У процесі експлуатації їхні несучі конструкції зазнають фізичного зносу, обумовленого утворенням тріщин, вивалів і локальних пошкоджень, що призводить до зниження тримаючої здатності. Усувати такі пошкодження потрібно за допомогою ремонтних технологій, які забезпечують збереження існуючих конструкцій і мінімальні перерви в русі поїздів. В Українському державному університеті залізничного транспорту розроблено і впроваджено конструктивно-технологічні рішення відновлення тримаючої здатності кам'яних, бетонних і залізобетонних оправ водопропускних труб і тунелів через улаштування металоін'єкційних сорочок. Разом із тим під час проектування тримаючу здатність сталевий оболонки таких сорочок зазвичай не враховували через складність верифікації результатів чисельних розрахунків. У статті наведено результати верифікації скінченно-елементних розрахунків напружено-деформованого стану склепінчастих металоін'єкційних конструкцій на основі порівняння з експериментальними та розрахунковими даними, отриманими для аналогічних сталобетонних аркових систем. Встановлено, що результати нелінійних розрахунків методом скінченних елементів мають задовільну збіжність з експериментальними даними, а отримані величини тримаючої здатності є консервативними, що дає змогу коректно застосовувати цей метод під час проектування.

Ключові слова: підземна споруда, оправа, склепіння, металоін'єкційна сорочка, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, тримаюча здатність.

Abstract. Railway structures such as bridges, culverts and tunnels are critical infrastructure facilities designed for long-term operation. During service life, their load-bearing structures undergo physical deterioration caused by cracking, spalling and local failures, which leads to a reduction in load-bearing capacity. Repair and rehabilitation of such structures should preferably be performed using technologies that preserve existing structural elements and ensure minimal interruption of railway traffic. At the Ukrainian State University of Railway Transport, innovative structural and technological solutions for restoring the load-bearing capacity of masonry, concrete and reinforced concrete linings of culverts and tunnels have been developed and successfully implemented. These solutions are based on the use of metal-injection jackets consisting of steel shells anchored to the

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Проказа Є. А., Плугін А. А., Фаст Д. А., Овчинніков О. О., Муригіна Н. О., 2026.

damaged lining and injection of repair mortar into the gap between the shell and the existing structure. However, during design, the contribution of the steel shell to the overall load-bearing capacity has traditionally been neglected due to difficulties in verifying numerical calculation results. This paper presents the results of verification of finite element calculations of the stress–strain state of vaulted metal-injection structures. The verification is performed by comparing numerical results with experimental and analytical data obtained for similar steel–concrete arch systems. Nonlinear finite element analyses were carried out using a specialized structural analysis software, and the obtained deformation diagrams and ultimate load values were compared with experimental results reported in the literature. The study shows that nonlinear finite element calculations provide a satisfactory agreement with experimentally observed stress–strain behaviour. The calculated ultimate load values are, on average, approximately 17.5% lower than the experimental ones, indicating a conservative nature of the method. This confirms the feasibility of using nonlinear finite element modelling for the design and assessment of metal-injection jackets in underground railway structures, provided that the identified deviation is properly accounted for at the design stage.

Keywords: *underground structure lining, vault, metal-injection jacket, finite element method, stress–strain state, load-bearing capacity.*

Вступ. Інженерні споруди залізниць – мости, водопропускні труби, тунелі – належать до відповідальних інженерних об'єктів із дуже тривалими строками експлуатації. У процесі експлуатації вони зазнають пошкоджень різного характеру, що призводить до накопичення фізичного зносу та зниження тримаючої здатності їхніх несучих конструкцій. Усувають такий знос відновленням експлуатаційних властивостей під час ремонтів, які доцільно виконувати без припинення руху або з мінімальними строками його обмеження. В УкрДУЗТ розроблено і впроваджено конструктивно-технологічні рішення ремонту залізобетонних і кам'яних мостів, водопропускних труб і тунелів із максимальним збереженням існуючих конструкцій та уникненням тривалих капітальних робіт [1]. Основою цих рішень є застосування металоін'єкційних сорочок через монтаж на пошкодженій конструкції сталеві оболонки на анкерах та ін'єктування ремонтної композиції в зазор між ними (рис. 1). Під час проектування металоін'єкційних сорочок їхня несуча здатність обґрунтована розрахунками методом скінченних елементів, які для балок, стояків тощо є повністю достовірними. Але для аркових оправ підземних залізничних споруд із сорочкою

зсередини (рис. 1) верифікація результатів цих розрахунків була досить обмеженою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналогічні металоін'єкційним сорочкам склепінь за принципом роботи сталобетонні арки досліджено в роботі [2], де напружено-деформований стан визначали методом скінченних різниць із подальшою верифікацією натурними експериментами. Отримані експериментальні діаграми деформування та значення руйнівних навантажень дали змогу оцінити точність застосованого розрахункового підходу. Порівняння результатів показало, що метод скінченних різниць може давати дещо завищені значення тримаючої здатності, тоді як сучасні нелінійні скінченно-елементні моделі (МСЕ/FEM) допомагають адекватніше відтворювати роботу конструкцій з урахуванням матеріальної та геометричної нелінійності. У цьому контексті особливого значення набуває розвиток і верифікація МСЕ-підходів для склепінчастих і оболонкових систем, зокрема конструкцій із комбінованою роботою матеріалів і складними граничними умовами, що прямо корелює з актуальністю завдання перевірки достовірності МСЕ для металоін'єкційних склепінчастих конструкцій.

Розвиток чисельного моделювання тонкостінних оболонкових систем демонструють дослідження циліндричних залізобетонних оболонок/склепінь. Так, у роботі [3] виконано нелінійний FEM-аналіз залізобетонної циліндричної оболонки з крайовими кільцевими (hoop) ребрами, де показано вплив підсилення вільних крайок і схеми з'єднання оболонки з крайовими балками на НДС і загальну працездатність системи. Питання динамічного впливу розкрито в роботі [4], де проаналізовано сейсмічну роботу циліндричних тонкостінних бетонних/залізобетонних покриттів і підкреслено роль просторової роботи оболонки для забезпечення сейсмостійкості прогонів малого та середнього діапазону. Практичний напрям верифікації чисельних моделей підтримують роботи, де поєднано експеримент і МСЕ: у роботі [5] запропоновано гібридну систему, у якій цегляне склепіння/тонка плитка (tile vault) виконує функцію незнімної опалубки для залізобетонної оболонки; проведено випробування прототипів і сформовано калібровану FEM-модель, що дає змогу пов'язати параметри матеріалів, тріщиноутворення і просторову жорсткість із реальними результатами тестування. Теоретичну основу для контролю достовірності нелінійних МСЕ-моделей становлять підходи граничного аналізу: у роботі [6] запропоновано наближені критерії текучості для елементів залізобетонних циліндричних оболонок і сформовано нижні оцінки несучої здатності, що можна застосовувати як еталон/обмеження для перевірки результатів нелінійних FEM-розрахунків. Додатково в роботі [7] акцентовано на аналітичному визначенні напружень у довгопрогонових тонких циліндричних оболонках (мембранна та згинальна складові) з окремим обґрунтуванням доцільності зіставлення FEM-аналізу у проєктній практиці, зокрема для раціональної деталізації армування та оцінювання чутливості відносно припущень моделі.

Крім оболонкових систем, суттєвий масив досліджень стосується зовнішнього

підсилення залізобетонних елементів сталевими листами/пластинами, що методологічно є близьким до задач моделювання комбінованої роботи матеріалів та інтерфейсів «бетон – сталь». У роботі [8] побудовано та провалідовано FEM-модель залізобетонної балки з приклеєною епоксидною композицією сталеву пластину; параметричний аналіз геометрії пластини (товщина/ширина/довжина) показав, що надмірне збільшення товщини може підвищувати ризик відшарування (debonding) і спричиняти передчасну втрату тримаючої здатності, тобто саме контактна (інтерфейсна) взаємодія визначає ефективність підсилення. FEM-моделювання застосовано для оцінювання підсилення термопошкоджених залізобетонних балок (сталеві пластини, а також CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer — вуглепластик), що допомагає простежити вплив геометрії та схеми підсилення на діаграму «навантаження – прогин», тріщиноутворення і залишкову жорсткість [9]. Фундаментальне пояснення механізмів відшарування наведено в роботі [10], де поведінку балок із зовнішньо приклеєними сталевими пластинами проаналізовано відносно лінійно-еластичної механіки руйнування і розрахункового моделювання умов ініціації/розвитку відшарування за наявності тріщин і міжшарових напружень. Експериментальну базу для калібрування контактних/когезійних моделей подано в роботі [11], де на випробуваннях продемонстровано приріст міцності і жорсткості та характер руйнування, включно з інтерфейсним відривом пластини, що є критично важливим для налаштування МСЕ-параметрів зчеплення. Конструктивні рішення зі зниження ризику передчасного відшарування узагальнено в роботі [12], де запропоновано закладні з'єднувачі/конектори для підсилення сталевими пластинами, що підвищують ефективність передавання зусиль і переводять руйнування від крихкого інтерфейсного сценарію до більш бажаного пластичного механізму.

Отже, аналіз робіт [2–12] показує, що сучасна практика дослідження аркових, склепінчастих та оболонкових систем еволюціонує від спрощених чисельних схем (зокрема методу скінченних різниць) до нелінійних МСЕ-моделей, здатних урахувати матеріальну деградацію, тріщиноутворення, геометричну нелінійність і контакт/зчеплення між поверхнями (інтерфейсами). Водночас головною умовою інженерної придатності таких моделей залишається верифікація (експериментальна або через надійні теоретичні обмеження – нижня оцінка реальної граничної несучої здатності (lower-bound)), що особливо актуально для систем зі складною композитною взаємодією і нестандартними технологіями підсилення, зокрема для металоін'єкційних склепінчастих конструкцій, де правильне відтворення контактної роботи, локальних механізмів пошкодження та реальних граничних умов визначає достовірність прогнозу несучої здатності і деформативності.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження – верифікація результатів розрахунків оправ підземних споруд із металоін'єкційними сорочками методом скінченних елементів для коректного застосування їх під час проектування.

Завдання дослідження: аналіз літературних джерел з експериментальними та розрахунковими даними про роботу аналогічних конструкцій; побудова скінченно-елементної моделі металоін'єкційної конструкції та проведення чисельного експерименту; порівняння результатів МСЕ з експериментальними та розрахунковими даними інших авторів.

Основна частина дослідження. Для верифікації можливості застосування методу скінченних елементів для проектування оправ підземних споруд із металоін'єкційними сорочками використано результати експериментальних досліджень сталобетонних аркових конструкцій, виконаних у роботі [2] (рис. 2). Вибір саме таких конструкцій зумовлений подібністю

характеру їхньої роботи до металоін'єкційних склепінь водопропускних труб і тунелів, які також складаються з жорсткої сталеві оболонки та бетонної або кам'яної основи, що працюють у взаємодії.

На основі геометричних параметрів натурних моделей, схеми навантаження (рис. 2) і граничних умов, прийнятих в експерименті [2], у програмному комплексі ЛІРА-САПР за аналогією зі статтею [13] побудовано скінченно-елементні моделі аркових конструкцій (рис. 3). Такий підхід забезпечив коректність подальшого порівняння результатів чисельного та натурального експериментів. Бетонну частину арки моделювали плоскими або просторовими скінченними елементами з урахуванням фізичної нелінійності матеріалу (рис. 3, а). Сталеву оболонку моделювали оболонковими елементами, жорстко зв'язаними з анкерами (рис. 3, б).

Контактну взаємодію між сталеві оболонкою та бетонною частиною враховували задаванням їхньої спільної роботи після ін'єктування, що відповідає реальній роботі металоін'єкційної сорочки після тверднення ремонтної композиції. Механічні характеристики матеріалів приймали на основі експериментальних даних і нормативних рекомендацій.

Навантаження прикладали ступінчасто з поступовим нарощуванням до досягнення граничного стану конструкції. Розрахунки виконували в нелінійній постановці з урахуванням фізичної нелінійності бетону і сталі, геометричної нелінійності від зростання переміщень, а також перерозподілу внутрішніх зусиль у процесі навантаження.

Ізополя переміщень перед досягненням граничного стану наведені на рис. 4. Отримані розрахунком значення руйнівних навантажень, якими характеризували тримаючу здатність, наведені в таблиці разом із величинами, отриманими експериментально та методом скінченних різностей [2]. У таблиці наведено також результати порівняння цих величин.

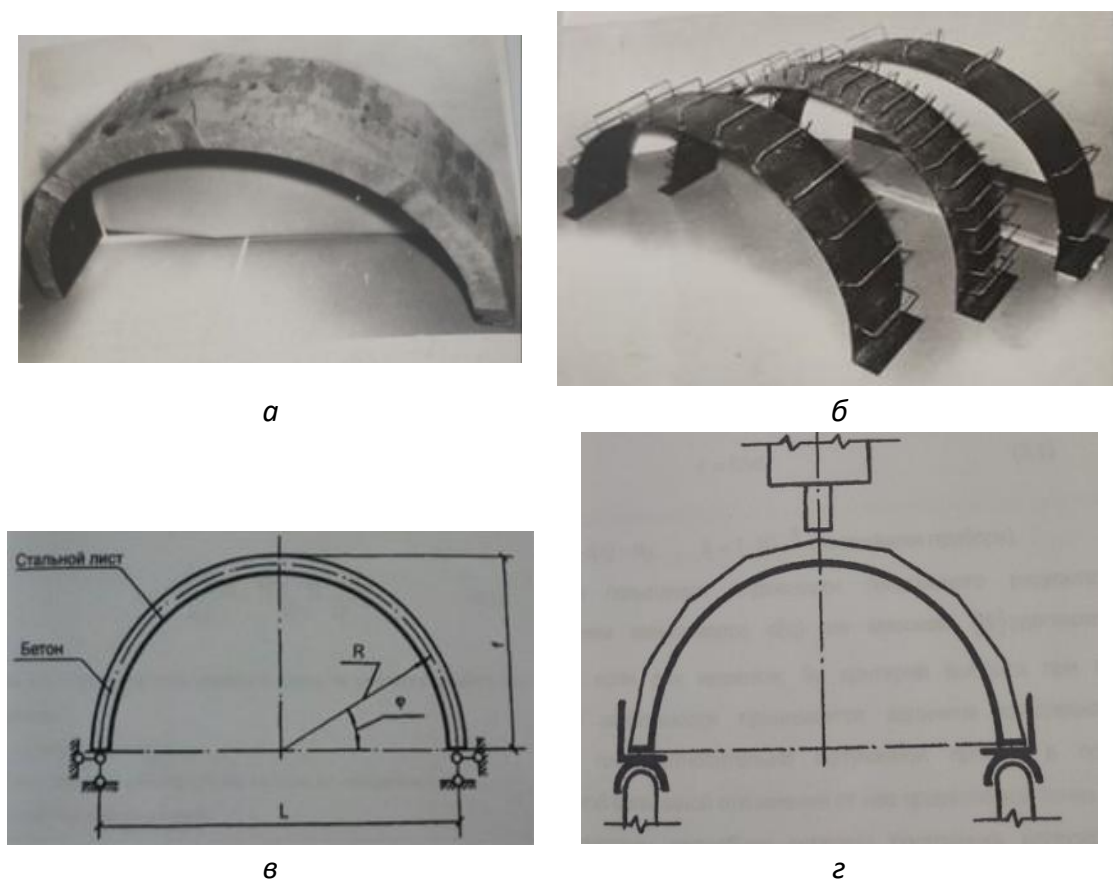


Рис. 2. Дослідження роботи сталобетонних арок [2]: а – натурна модель арки; б – сталеві листи арок з анкерними скобами з кроком 50, 100 і 150 мм; в – розрахункова схема; г – схема навантаження під час натурального експерименту

За результатами чисельного експерименту отримано діаграми радіальних переміщень у склепінні арок і визначено величини руйнівних навантажень. Порівняння розрахункових і експериментальних діаграм деформування (рис. 5) показало, що на початкових стадіях навантаження до приблизно 20 % граничного спостерігають практичний збіг результатів. Це свідчить про адекватність прийнятої розрахункової моделі та коректність опису спільної роботи сталеві оболонки і бетонної частини конструкції.

За вищих рівнів навантаження відмічено певну розбіжність між чисельними та експериментальними кривими деформування, яка проявляється в

дещо більших розрахункових переміщеннях. Така відмінність, імовірно, зумовлена як особливостями прийнятих моделей матеріальної нелінійності, так і обмеженими технічними можливостями вимірювальних засобів, що застосовували під час проведення експериментальних досліджень [2]. Разом із тим порівняння величин тримаючої здатності (таблиця) показало їхню задовільну збіжність, що дає змогу дійти висновку про придатність нелінійного методу скінченних елементів для аналізу та проектування металоін'єкційних склепінчастих конструкцій за умови коректної інтерпретації результатів розрахунку.

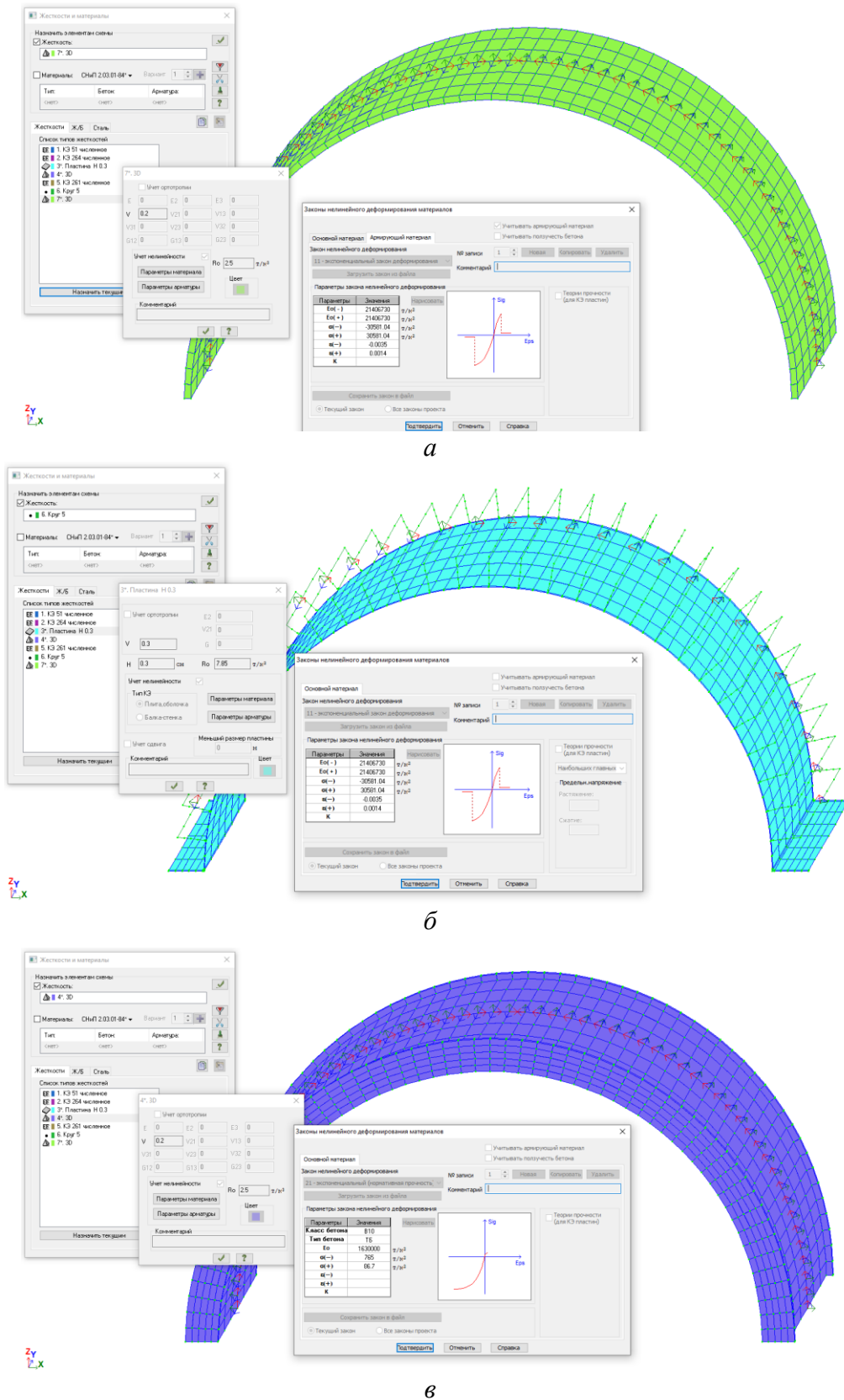


Рис. 3. Розрахункова модель сталобетонної арки з кроком анкерних петель 50 мм: а – бетонної частини без арматури; б – металеві оболонки; в – бетонної частини з арматурою

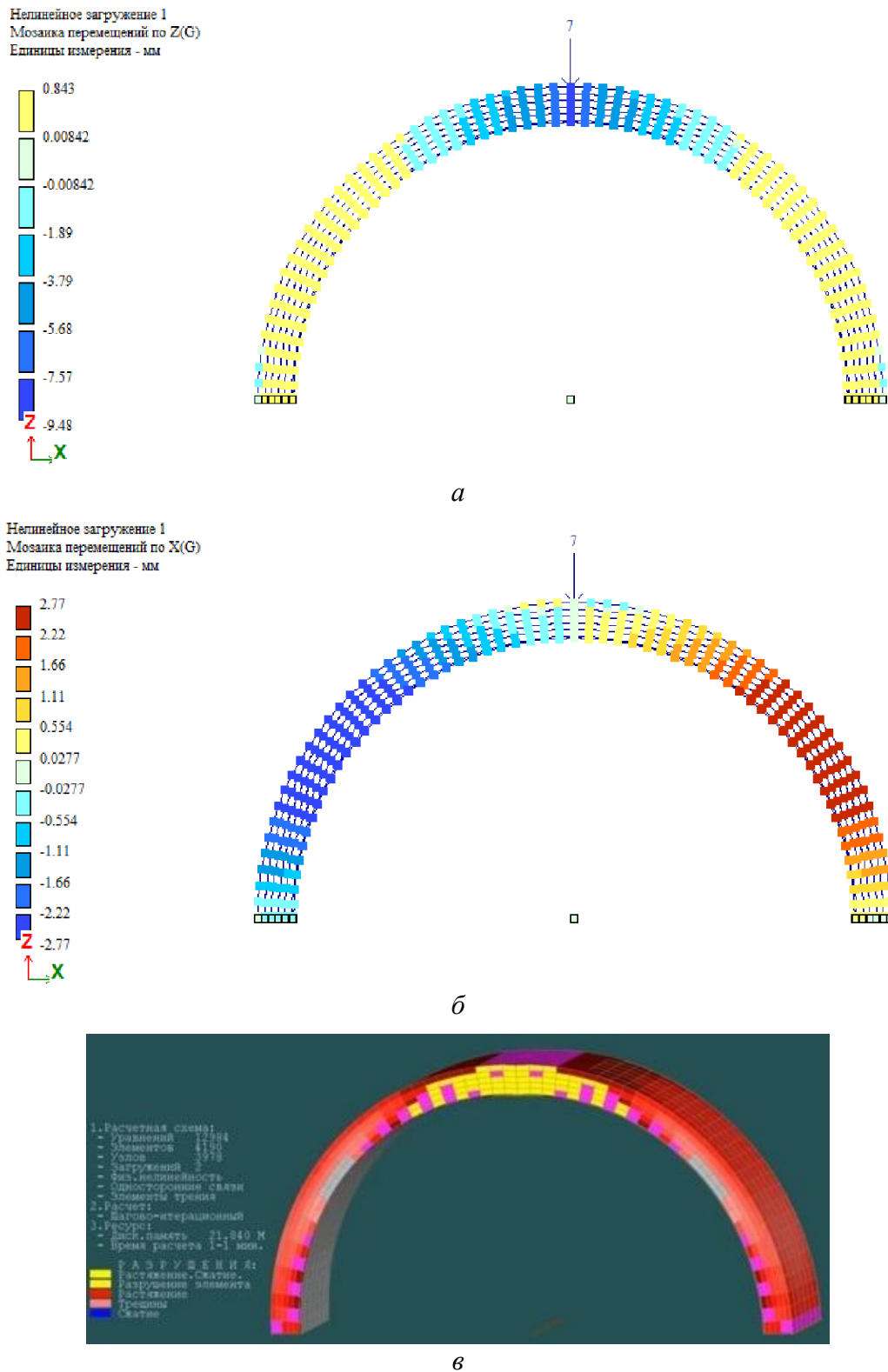


Рис. 4. Результати дослідження роботи сталобетонної арки з кроком анкерних петель 50 мм: *a* – ізополя переміщень по осі Z (мм); *б* – те саме по осі X (мм); *в* – зони руйнування FEM-моделі

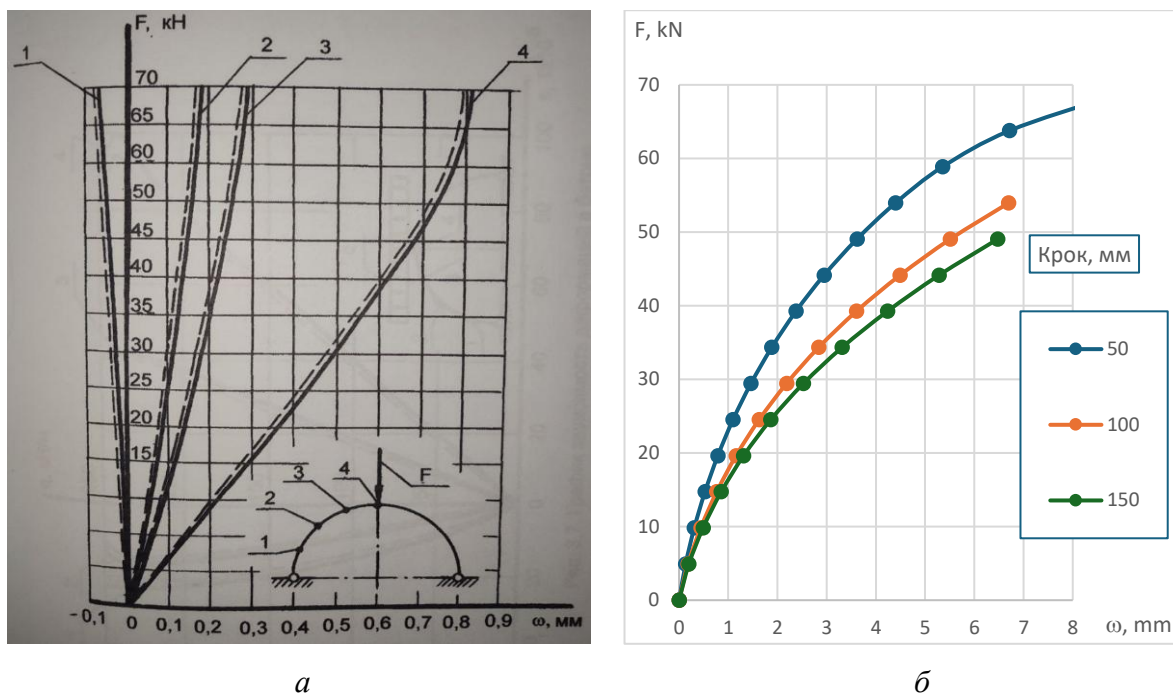


Рис. 5. Результати дослідження роботи сталобетонних арок: *а* – діаграми радіальних переміщень ω арки з кроком анкерних петель 50 мм, визначених розрахунком методом скінченних різностей (суцільна лінія) та експериментально (штрихова лінія) [2]; *б* – діаграми радіальних переміщень у замку ω FEM-моделі арки з кроком анкерних петель 50, 100 і 150 мм

Таблиця 1

Порівняльна таблиця тримаючої здатності моделей, отриманої експериментально та розрахунками

Крок анкерних петель моделі, мм	Тримаюча здатність (руйнівне навантаження) F і відхилення від експериментального значення Δ						
	Експериментальна величина F , кН	Розрахункові величини, отримані методом скінченних різностей					
		за граничною рівновагою		за напружено-деформованим станом		скінченних елементів	
		F , кН	Δ , %	F , кН	Δ , %	F , кН	Δ , %
50	70	72	+2,8	74	+7,0	69	-1,4
100	71	72	0	74	+4,1	54	-24,7
150	66	72	+7,4	74	+11,8	49	-26,4
Сер.			+3,4		+7,6		-17,5

Висновки. Встановлено, що метод скінченних різниць у середньому дає завищення тримаючої здатності сталобетонних аркових конструкцій приблизно на

7,6 % відносно експериментальних даних. Нелінійні розрахунки методом скінченних елементів дають значення тримаючої

здатності, які в середньому на 17,5 % менші за експериментальні.

Отримано задовільну відповідність між розрахунковими та експериментальними характеристиками напружено-деформованого стану металоін'єкційних склепінчастих конструкцій. Метод

скінченних елементів у нелінійній постановці може бути коректно застосований для проектування оправ підземних споруд із металоін'єкційними сорочками за умови врахування виявленого зниження розрахункової тримаючої здатності.

Список використаних джерел

1. Плугін, А. А., Мірошніченко, С. В., Калінін, О. А., Никитинський А. В., Лютий, В. А., Афанасьєв, О. В. (2018). Нові конструктивно-технологічні рішення ремонту залізобетонних і кам'яних мостів і водопропускних труб: Досвід експлуатації після ремонту. *Українська залізниця*, 6(60), 19–24.
2. Молдавська, Т. А. (1997). *Напружено-деформований і граничний стан сталобетонних склепін* [Дис. канд. техн. наук, 05.23.01, ХарДАЗТ,] Харків.
3. Hara, T. (2017). Numerical Analysis of R/C Cylindrical Shell with Hoop Edge Beams. *Procedia Engineering*, 171, 789–796. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.464>
4. Hammood, A. M., & Jawad, D.A.M. (2023). Seismic Evaluation of Cylindrical Concrete Shells. *Open Engineering*, 13, 20220417. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0417>
5. López López, D. et al. (2023). Experimental testing and structural analysis of composite tile – reinforced concrete domes. *Engineering Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116512>
6. Surayya, K. (1980). Limit analysis of reinforced concrete cylindrical shell roofs. *Building and Environment*, 15(4), 223-234. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(80\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(80)90003-7)
7. Barbhuiya, G.H., Hasan, S.D., & Al-Rashid, M.H. (2021). Analysis and Design of Reinforced Concrete Thin Cylindrical Shell. *Journal of Physics: Conference Series*, 2070(1), 012162. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2070/1/012162>.
8. Kholil, M.I., & Ahmed, A. (2026). Finite element modelling of RC beam strengthened with epoxy-bonded steel plate. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 11 1. <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00672-y>.
9. Eng, L., & Kim, C. (2025). Finite-Element Analysis of Flexural Strengthening Performance of Fire-Damaged RC Beams. *Int J Concr Struct Mater*, 19, 47. <https://doi.org/10.1186/s40069-025-00789-x>
10. Hamoush, S.A., & Ahmad, S.H. (1990). Debonding of Steel Plate-Strengthened Concrete Beams. *Journal of Structural Engineering*, 116(2), 356–371. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:2\(356](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:2(356)
11. Hamoush, S.A., & Ahmad, S.H. (1990). Static strength tests of steel plate strengthened concrete beams. *Materials and Structures*, 23, 116–125. <https://doi.org/10.1007/BF02472571>
12. Alam, M. A., Sami, A. & Mustapha, K. N. (2017). Embedded Connectors to Eliminate Debonding of Steel Plate for Optimal Shear Strengthening of RC Beam. *Arab J Sci Eng*, 42, 4053–4068. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2572-5>
13. Lobiak, A., Plugin, A., Kravtsiv, L., & Kovalova, O. Modelling of motorway bridge spans under modernization with consideration of rheological properties of the materials. (2018). *Matec Web of Conferences*, 234, 04004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823404004>

References

1. Plugin, A. A., Miroshnichenko, S. V., Kalinin, O. A., Nikitinskyi A. V., Lyuty, V. A., & Afanasiev, O. V. (2018). Novi konstruktyvno-tekhnologichni rishennya remontu zalizobetonnykh i kam'yanykh mostiv i vodopropuskykh trub: Dosvid ekspluatatsiyi pislya remontu [New structural and technological solutions for the repair of reinforced concrete and stone bridges and culverts: Experience of operation after repair]. *Ukrainian railway*, 6(60), 19–24.
2. Moldavska, T. A. (1997). Napruzhenno-deformovany i hranychnyy stan stalebetonnykh sklepin' [*Stress-strain and limit state of reinforced concrete arches*] [Dissertation of the candidate of technical sciences, 05.23.01, Kharkiv State Academy of Railway Transport.] Kharkiv.
3. Hara, T. (2017) Numerical Analysis of R/C Cylindrical Shell with Hoop Edge Beams. *Procedia Engineering*, 171, 789–796. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.464>
4. Hammood, A. M., & Jawad, D.A.M. (2023) Seismic Evaluation of Cylindrical Concrete Shells. *Open Engineering*, 13, 20220417. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0417>
5. López López, D. et al. (2023). Experimental testing and structural analysis of composite tile – reinforced concrete domes. *Engineering Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116512>
6. Surayya, K. (1980). Limit analysis of reinforced concrete cylindrical shell roofs. *Building and Environment*, 15(4), 223–234. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(80\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(80)90003-7)
7. Barbhuiya, G.H., Hasan, S.D., & Al-Rashid, M.H. (2021). Analysis and Design of Reinforced Concrete Thin Cylindrical Shell. *Journal of Physics: Conference Series*, 2070(1), 012162. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2070/1/012162>.
8. Kholil, M.I., & Ahmed, A. (2026). Finite element modelling of RC beam strengthened with epoxy-bonded steel plate. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 11 1. <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00672-y>.
9. Eng, L., & Kim, C. (2025). Finite-Element Analysis of Flexural Strengthening Performance of Fire-Damaged RC Beams. *Int J Concr Struct Mater*, 19, 47. <https://doi.org/10.1186/s40069-025-00789-x>
10. Hamoush, S.A., & Ahmad, S.H. (1990). Debonding of Steel Plate-Strengthened Concrete Beams. *Journal of Structural Engineering*, 116(2), 356–371. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:2\(356](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:2(356)
11. Hamoush, S.A., & Ahmad, S.H. (1990). Static strength tests of steel plate strengthened concrete beams. *Materials and Structures*, 23, 116–125. <https://doi.org/10.1007/BF02472571>
12. Alam, M. A., Sami, A. & Mustapha, K. N. (2017). Embedded Connectors to Eliminate Debonding of Steel Plate for Optimal Shear Strengthening of RC Beam. *Arab J Sci Eng*, 42, 4053–4068. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2572-5>
13. Lobiak, A., Plugin, A., Kravtsov, L., & Kovalova, O. Modelling of motorway bridge spans under modernization with consideration of rheological properties of the materials. (2018). *Matec Web of Conferences*, 234, 04004. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823404004> [in English].

Проказа Євгеній Анатолійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0000-7345-2145. Тел.: +38 (095) 166-51-10. E-mail: prokazaevgeniya@gmail.com.

Плугін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (050) 533-68-85. E-mail: aaplugin@gmail.com.

Фаст Денис Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8158-2476. Тел.: +38 (093) 965-08-45. E-mail: denia0071981@gmail.com.

Овчинніков Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1194-4387. Тел.: +38 (050) 780-63-39. E-mail: ovchinnicov_77@ukr.net.

Муригіна Надія Олександрівна, PhD (Tech.), старший викладач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8843-285X. E-mail: murygina@kart.edu.ua.

Yevhenii Prokaza, Postgraduate Student of Railway Track and Transport Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0000-7345-2145. Tel.: +38 (095) 166-51-10. E-mail: prokazaevgeniya@gmail.com.

Andrii Plugin, Doctor of Technical Sciences, Head of Railway Track and Transport Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38 (050) 533-68-85. E-mail: aaplugin@gmail.com.

Denis Fast, PhD, Associate Professor of Railway Track and Transport Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8158-2476. Tel.: +38 (093) 965-08-45. E-mail: denia0071981@gmail.com.

Oleksandr Ovchynnikov, PhD, Associate Professor of Railway Track and Transport Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1194-4387. Tel.: +38 (050) 780-63-39. E-mail: ovchinnicov_77@ukr.net.

Nadiia Murygina, PhD (Tech), Senior lecturer of the Department Railway tracks and transportation infrastructure, Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0001-8843-285X. E-mail: murygina@kart.edu.ua.

Дата надходження статті 18.02.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 19.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY