

УДК 624.012.45

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ НАПІВКРУГЛИХ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРОК ІЗ ЗАТЯЖКОЮ, ВИГОТОВЛЕНИХ
МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ**

**EXPERIMENTAL TESTS OF SEMICIRCULAR REINFORCED
CONCRETE ARCHES WITH TIGHTENING, MANUFACTURED BY 3D
PRINTING METHOD**

Демчина Б.Г., д.т.н., професор, ORSID: 0000-0002-3498-1519; **Вознюк Л.І.**, к.т.н., доцент, ORSID: 0000-0001-9512-8338; **Щербаков С.О.**, аспірант, ORCID: 0009-0007-7645-2133; (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна); **Фурман І.А.**, ORCID: 0009-0004-3012-0772 (ТОВ "ЗД ТЕХНОЛОГІЇ "ЮТУ")

Demchyna B.G., Sc.D., professor, ORCID: 0000-0002-3498-1519, **Vozniuk L.I.**, Ph.D., associate professor, ORCID: 0000-0001-9512-8338; **Shcherbakov S.O.**, postgraduate student, ORCID: 0009-0007-7645-2133, (Lviv Polytechnic National University, Lviv); **Furman I.A.**, ORCID: 0009-0004-3012-0772, (LLC "3D TECHNOLOGIES UTU")

У статті описано дослідження роботи напівкруглих залізобетонних арок із затяжкою, виготовлених методом будівельного 3D-друку. Експериментальні випробування проведено за схемою короткочасного ступінчастого навантаження з прикладанням зусиль у третинах прольоту. Проаналізовано залежності «навантаження – деформації» та «навантаження – прогин».

The paper presents the results of experimental testing of semicircular tied reinforced concrete arches manufactured using construction-scale 3D printing technology and reinforced along the entire length. Two experimental specimens (A-1.1.1 and A-1.1.2) were tested under short-term stepwise loading applied at two points located at the third-span positions, which ensured the formation of a characteristic combination of axial forces and bending typical for semicircular tied arches. The research programme included recording longitudinal strains in concrete and reinforcement at characteristic cross-section levels (upper and middle zones), as well as measuring vertical mid-span deflections. The obtained results are presented in the form of load–strain and load–deflection relationships. The experimental curves demonstrate stable

structural behaviour over a significant portion of the loading range. At the initial and intermediate stages, a gradual and nearly linear increase in strains was observed without abrupt changes in curve inclination, indicating the absence of premature separation of the concrete layers formed during the 3D printing process. The arches maintained stiffness and integrity up to approximately 85–90% of the ultimate load, confirming adequate interlayer bonding and efficient composite action of the arch ring and tie system. Readings from indicators installed at symmetric points remained close, indicating the absence of significant unintended eccentricities during testing. Failure of both specimens was localized and occurred along a normal crack in the load application zone near the movable hinge, where the combined effect of axial force and bending moment reached critical values while the overall arch action remained preserved. After unloading, the structures tended to return to their initial design position, confirming predominantly elastic behaviour at service-level loading. The obtained experimental results confirm the feasibility of using high 3D-printed tied arches as load-bearing systems and may be applied for numerical modelling and for developing recommendations for automated construction technologies.

Ключові слова: 3D-друк; залізобетонна арка; напівкругла арка; затяжка; залізобетон; деформації; прогини.

3D printing; reinforced concrete arch; semicircular arch; tightening; reinforced concrete; deformations; deflections.

Вступ. Арочні конструкції традиційно вважаються одними з найбільш раціональних несучих систем. Розвиток технології будівельного 3D-друку відкрив нові можливості для виготовлення криволінійних бетонних і залізобетонних елементів без застосування традиційної опалубки. Разом із тим шарувата структура 3D-друкованого бетону та особливості процесу формування елементів зумовлюють необхідність експериментального підтвердження їхньої несучої здатності, деформативності та загальної надійності. Особливо актуальним це є для арочних систем із затяжкою, у яких взаємодія арочного кільця та затяжки визначає характер внутрішніх зусиль і чутливість конструкції до змін жорсткості. Це зумовлює необхідність проведення експериментальних досліджень таких конструкцій.

Аналіз останніх досліджень. Стрімкий розвиток технологій будівельного 3D-друку зумовив формування нових підходів до виготовлення залізобетонних конструкцій складної просторової форми. Узагальнюючі огляди сучасного стану адитивного виробництва в будівництві наведені у роботах [1, 2], де окреслено основні напрями розвитку та проблеми забезпечення надійності надрукованих елементів. Дослідження архітектурних і конструктивних можливостей 3D-друку підтверджують значний потенціал технології для створення криволінійних і просторових систем [3]. Важливим

чинником їх працездатності є технологічні властивості бетонної суміші та стабільність процесу екструзії, що розглянуто у роботі [4]. Окремий напрям пов'язаний із питаннями армування 3D-друкованих елементів і забезпечення їх несучої здатності. У працях [5, 6] проаналізовано сучасні підходи до інтеграції арматури та вплив шаруватої структури на роботу перерізів і довговічність конструкцій. В Україні дослідження технології будівельного 3D-друку виконуються науковцями НУЛП [7], де розглянуто особливості виготовлення бетонних напівкруглих неармованих арок з затяжкою, а також питання армування їх опорних ділянок. Отримані результати підтверджують можливість створення залізобетонних конструкцій із використанням адитивних технологій. Разом із тим аналіз джерел свідчить, що експериментальні дослідження напівкруглих залізобетонних арок із затяжкою, виготовлених методом 3D-друку та армованих по всій довжині, залишаються недостатньо висвітленими.

Постановка мети і завдань досліджень. Метою дослідження було розроблення комплексної методики експериментальних випробувань напівкруглих залізобетонних арок із затяжкою, виготовлених із застосуванням технології будівельного 3D-друку, при дії зосередженого навантаження. У межах поставленої задачі передбачалося опрацювання конструктивних рішень таких арок, створення лабораторного стенду, а також формування методики проведення експериментальних досліджень з метою оцінювання їх напружено-деформованого стану, несучої здатності та деформативності. Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання: отримати експериментальні залежності «навантаження – відносні деформації» у характерних точках перерізу; дослідити залежності «навантаження – прогин» у середині прольоту; проаналізувати симетричність роботи конструкції за показами вимірювальних приладів; оцінити характер зміни жорсткості зі зростанням навантаження.

Методика досліджень. Для реалізації програми досліджень були виконані робочі креслення дослідних конструкцій напівкруглих арок і розроблена технологія їх виготовлення з використанням будівельного 3D-принтера. Виготовлення арок здійснювалося українською компанією ТОВ «UTU» відповідно до технологічної послідовності, запропонованої авторами роботи. З метою встановлення фізико-механічних характеристик бетону арки були виготовлені контрольні зразки у вигляді кубів і призм із тієї ж бетонної суміші, що застосовувалася під час друку експериментальних арок. Окрім цього, проведено експериментальне визначення механічних властивостей арматури та металеві затяжки, які використовувалися в конструкціях напівкруглих арок. Запропонована технологія виготовлення арок за допомогою будівельного 3D-принтера забезпечила отримання конструкцій, геометричні та конструктивні параметри яких відповідають попередньо прийнятим проектним і технологічним рішенням [7]. Загальний вигляд та конструктивна схема дослідних арок наведені на рис. 1.

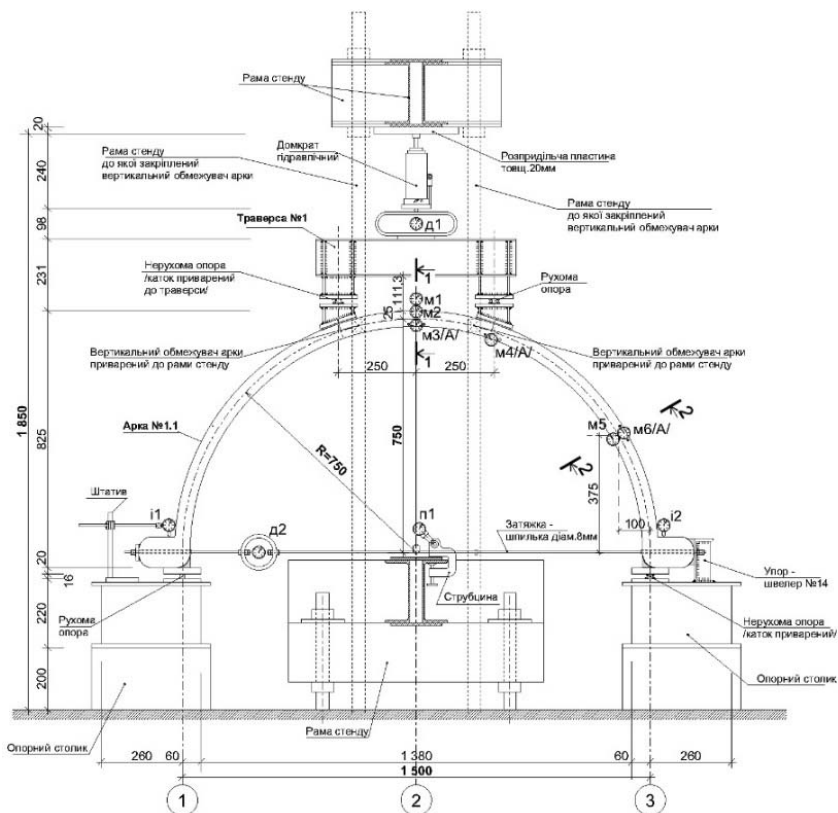
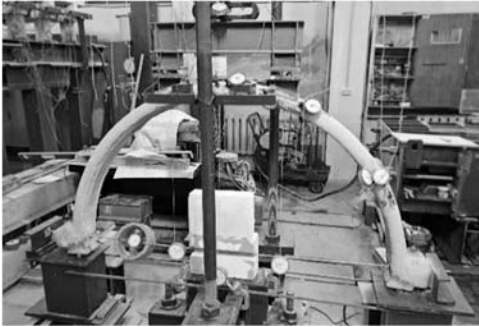


Рис.2. Стенд для випробувань в осях 1-3

д1, д2 – скоб'яний динамометр і кільцевий динамометр; п1 – прогиномір Аістова; і1, і2 – індикатори годинникового типу; м1-м11 – мікроіндикатори годинникового типу; переріз 1-1 і переріз 2-2 див.графіки на рис.4 і рис.5

Відповідно до запропонованої методики були виконані експериментальні випробування двох залізобетонних напівкруглих арок із затяжкою (арки марок А-1.1.1 та А-1.1.2) виготовлених методом будівельного 3D-друку (рис. 3). За результатами експерименту встановлено, що зафіксовані зони руйнування дослідних арок узгоджуються з попередніми розрахунковими оцінками напружено-деформованого стану. Втрата несучої здатності обох конструкцій відбулася по нормальному перерізу в області максимальних осевих зусиль і згинальних моментів — поблизу точки прикладання навантаження зі сторони рухомого шарніру.

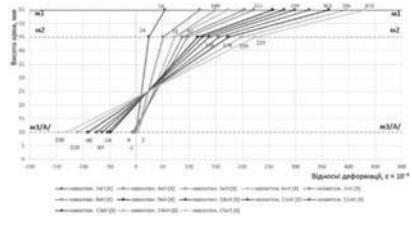
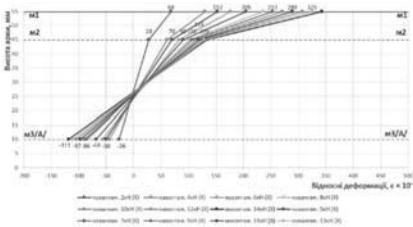


а)

б)

Рис. 3. Фото арки А-1.1.1. а) до експерименту, б) зруйнована арка

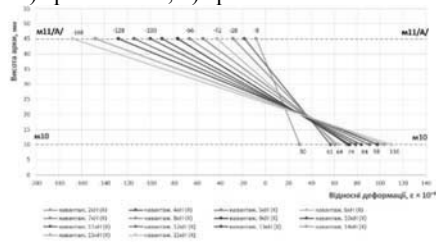
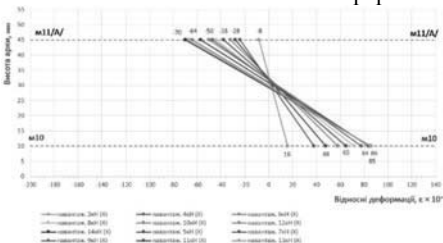
Результати досліджень. Отримані результати були опрацьовані та подані у вигляді графіків залежності відносних поздовжніх деформацій бетону та арматури по перерізах (див.рис.2) арок від прикладеного навантаження (рис. 4,5), а також діаграми залежності вертикальних прогинів посередні прольоту арок від рівня навантаження (рис. 6).



а)

б)

Рис. 4. Графіки залежності відносних поздовжніх деформацій від прикладеного навант. в перерізі 1-1. а) арка А-1.1.1, б) арка 1.1.2.



а)

б)

Рис. 5. Графіки залежності відносних поздовжніх деформацій від прикладеного навант. в перерізі 2-2. а) арка А-1.1.1, б) арка 1.1.2.



а)

б)

Рис. 6. Діаграма залежності прогинів від прикладеного навантаження поєдині прольоту арок. а) арка А-1.1.1, б) арка 1.1.2

Аналіз експериментальних кривих показав, що робота напівкруглих 3D-друкованих арок має стабільний характер протягом усіх етапів прикладання навантаження. На початкових та середніх стадіях навантаження деформації зростають поступово і мають близьку до лінійної залежність без різких змін нахилу кривих. Така поведінка свідчить про відсутність передчасного розшарування бетонних шарів, сформованих у процесі 3D-друку. Збереження жорсткості конструкцій до досягнення приблизно 85–90 % від руйнівного навантаження підтверджує ефективне зчеплення шарів між собою та забезпечує роботу арки із затяжкою як єдиної просторової системи. При цьому, результати вимірювань відносних деформацій у верхніх і нижніх зонах перерізів свідчать про переважання стискаючих напружень у верхній частині арочного кільця та поступове збільшення впливу згину зі зростанням навантаження, що є характерним саме для напівкруглих арок. Діаграми залежності «навантаження — прогин» демонструють плавний розвиток переміщень без різких втрат жорсткості, що підтверджує раціональність обраної конструктивної схеми. Після зняття навантаження арки практично поверталися у початкове проектне положення, що свідчило про переважно пружний характер деформування на експлуатаційних рівнях навантаження.

Отже, можна зробити висновок, що розподіл внутрішніх зусиль у перерізах високих арок є раціональним, а запропонована конструктивна схема придатна для застосування в умовах автоматизованого будівництва із використанням технології 3D-друку.

Висновки та рекомендації. Проведене експериментальне дослідження підтвердило можливість виготовлення напівкруглих несучих арочних конструкцій складної геометрії із застосуванням будівельного 3D-принтера.

Розроблена методика випробувань дозволила оцінити роботу арок із урахуванням їхньої криволінійної геометрії та наявності затяжки, а також зафіксувати закономірності зміни деформацій у характерних точках перерізу.

Руйнування дослідних зразків мало локальний характер і відбувалося в зоні максимальних внутрішніх зусиль, що відповідало класичним уявленням про роботу напівкруглих арочних систем.

Аналіз графіків відносних деформацій і прогинів показав поступовий розвиток деформування без різких втрат жорсткості до досягнення граничних рівнів навантаження, що свідчило про відсутність передчасного розшарування бетонних шарів, сформованих у процесі 3D-друку, що підтвердило ефективність прийнятого конструктивного рішення арок.

Отримані результати можуть бути використані як експериментальна база для подальшого чисельного моделювання та формування нормативних підходів до проектування 3D-друкованих залізобетонних конструкцій.

1. Guamán-Rivera R., Martínez-Rocamora A., García-Alvarado R. Recent developments and challenges of 3D-printed construction: a review of research fronts // *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 2. 229.

2. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. P. 37–49.

3. Žujović M. et al. 3D printing technologies in architectural design and construction: a review // *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 9. 1389.

4. Rahman M. et al. A comprehensive review on fresh and rheological properties of 3D printable cementitious composites // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 430. 136991.

5. Wu Z. et al. State-of-the-art review on reinforcement strategies for printed concrete structures // *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 3. 1038.

6. Marchment T., Sanjayan J. Reinforcement strategies for extrusion-based 3D printed concrete: state-of-the-art review // *Materials and Structures*. 2024. Vol. 57. 112.

7. Demchyna B., Vozniuk L., Shcherbakov S., Burak D., Artemenko V., Hnes I. 3D printing of a semi-circular unreinforced arch using a building printer // *Applied mechanics : book of abstracts of the 12 International scientific session (Bydgoszcz, Poland, November 15, 2024)*. 2024. P. 12.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	20.02.2026	Received	20.02.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	04.03.2026	Received in revised form	04.03.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.