

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ АРКИ З ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ****RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF A REINFORCED
CONCRETE ARCH FROM HIGH-STRENGTH CONCRETE**

**Бабич Є. М., д. т. н., проф., ORCID ID: 0000-0003-1746-9991; Караван Б. В.,
аспірант, ORCID ID: 0000-0002-0492-7544 (Національний університет
водного господарства та природокористування)**

**Babich Y., Dr., Prof. ORCID ID: 0000-0003-1746-9991; Karavan B.,
postgraduate student, ORCID ID: 0000-0002-0492-7544 (National University of
Water Management and Nature Resources Use, Rivne)**

**В статті наведені методика та результати експериментальних досліджень
моделі арки з затяжкою, виготовленої із високоміцного важкого бетону.
Описано напружено-деформований стан арки за дії статичних
короткочасних навантажень до руйнування, визначена її несуча
здатність.**

**Reinforced concrete arch structures are widely used to cover industrial, civil,
agricultural buildings, as well as load-bearing structures of engineering
structures, in the construction of artificial transport structures, in fortification
construction. There is a small number of experimental studies of the stress-
strain state of reinforced concrete arches under force influences of different
action and intensity both in Ukraine and abroad. There are no data on studies
of the stress-strain state of arch structures made of high-strength concrete
under the action of single and repeated static and dynamic loads in the
scientific literature. The aim of this work is to determine, by means of
experimental and theoretical studies of reinforced concrete arches made of
high-strength concrete, the change of the stress-strain state in the cross-
sections of the curved belt and the nature of their destruction under the action
of static loads. To achieve this goal, the following tasks were solved: developed
the design and manufactured prototypes of high-strength concrete; developed
a methodology for experimental research and performed tests of prototypes;
processed and analyzed experimental data. To perform experimental studies
of the 2nd series, the main prototypes were made in the form of 3 double-joint
reinforced concrete arches of high-strength concrete of class C75. The arch A-
1(2) was tested in the installation mounted on the basis of the hydraulic press
UIM-200 for the action of step short-term static load to destruction. The
destructive load for the arch A-1(2) according to the results of experimental
studies was $P_u = 90$ kN. The deflection of the arch at the last stage of loading**

was $f = 7$ mm, the dependence of the change in deflection on the loads to failure has a clearly expressed linear character. At the 18th stage of loading at $R_u = 90$ kN, the deflection and crack opening width in the arch belt reached the limit values.

Ключові слова: арка, бетон, арматура, залізобетон, навантаження, деформації, прогин, тріщина, несуча здатність, руйнування.
Arch, concrete, reinforcement, reinforced concrete, load, deformation, deflection, crack, bearing capacity, destruction.

Вступ. Залізобетонні абочні конструкції широко використовуються для покриття промислових, цивільних, сільськогосподарських будівель, а також як несучі конструкції інженерних споруд, при зведенні штучних транспортних споруд, в фортифікаційному будівництві тощо. Залізобетонні абочні конструкції покриття, виготовлені із високоміцних бетонів, фібробетонів, сталеві фібробетонів тощо, особливо ефективні у захисних споруд військового призначення. Як правило, для будівель і споруд промислового та цивільного призначення, проєктують залізобетонні арки прольотом 18...36 м. У фортифікаційних же спорудах проліт арок становить від 2 м.

Аналіз останніх досліджень. Проведених експериментальних досліджень напружено-деформованого стану залізобетонних арок на силові впливи різної дії та інтенсивності як в Україні, так і за кордоном досить невелика кількість. Дані щодо досліджень напружено-деформованого стану абочних конструкцій з високоміцного бетону на дію одноразових і повторних статичних та динамічних навантажень в науковій літературі відсутні.

Експериментальні дослідження трьох арок прольотом 2,0 м, виготовлених із важкого бетону класу C16/20 та армованих стержнями діаметром 10 мм класу A500C, були виконані у Луцькому національному технічному університеті [1]. В роботі за мету ставилося встановити вплив повторних навантажень на зміну напружено-деформованого стану криволінійного поясу арки та виконати його математичне модулювання для теоретичного визначення такого впливу. Експериментом встановлена дійсна робота арок та визначено характер руйнування й величина руйнуючих зусиль. Необхідно відмітити, що в дослідях для виготовлення дослідних зразків використано бетон низької міцності, а в основу числового експерименту покладена методика нормативного документа, який на сьогодні втратив чинність.

В роботі [2] запропонована конструктивна схема споруди цивільного захисту, яка складається з підземної просторової системи конструкцій з монолітного залізобетону, а покриття зводиться із збірних залізобетонних арок, виготовлених з високоміцного бетону. Детально розглядається статичний розрахунок арки з урахуванням можливого додаткового динамічного навантаження. При розрахунку арок з високоміцного бетону за

граничними станами першої групи пропонується використовувати спрощену діаграму механічного стану бетону при стиску. Експериментально це положення не підтверджено. Докладно в роботі [2] розглядається армування арок та їх вузлів.

Враховуючи незначну кількість експериментальних досліджень залізобетонних арочних конструкцій та відсутність таких досліджень арок виготовлених з високоміцних бетонів, є актуальним вивчення експериментальним шляхом напружено-деформованого стану арок з високоміцних бетонів на дію силових впливів різного характеру та інтенсивності.

Постановка мети і задач досліджень. В наукових пошуках поставлено за мету шляхом експериментальних та теоретичних досліджень залізобетонних арок з високоміцних бетонів встановити зміну напружено-деформованого стану у перерізах криволінійного поясу та характер їх руйнування за дії статичних навантажень.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні завдання: розроблена конструкція та виготовлені дослідні зразки з високоміцних бетонів; розроблено методику експериментальних досліджень та виконані випробування дослідних зразків; здійснена обробка і аналіз експериментальних даних.

Дослідні зразки та матеріали для їх виготовлення. Для виконання експериментальних досліджень 2-ї серії виготовили основні дослідні зразки у вигляді 3-х двошарнірних залізобетонних арок з високоміцного бетону класу С75 та допоміжні зразки у вигляді кубів і призм для визначення механічних характеристик бетону. Арки мали розрахунковий проліт $L = 200$ см, повну висоту $H = 52$ см, стрілу підйому $f = 40$ см та поперечний переріз криволінійного поясу $10(b) \times 14(h)$ см (див. рис. 1).

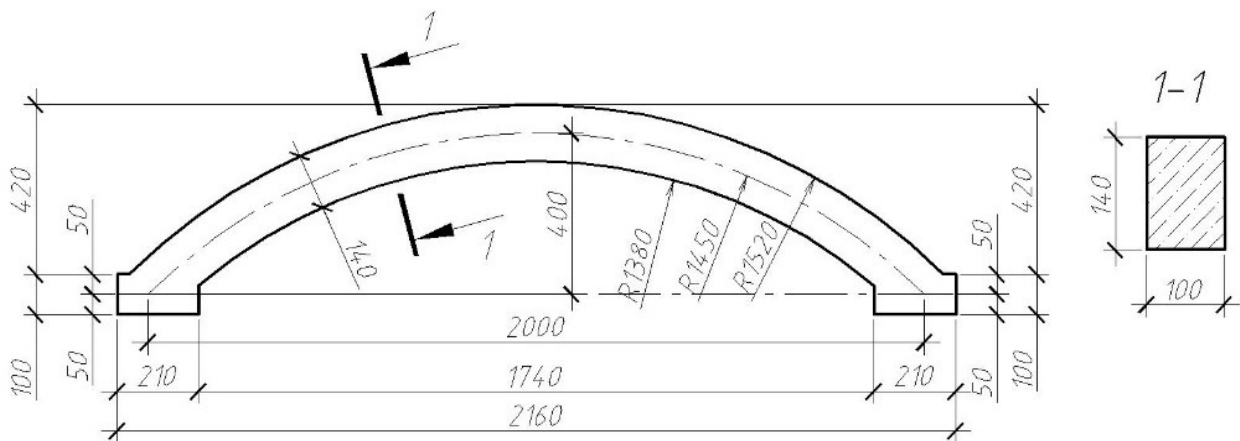


Рис. 1. Опалубне креслення дослідних зразків арок (розміри в мм)

Бетон виготовлявся за складом Ц:Щ:П=1:1,70:1,36 при В/Ц =0,22 з добавкою 10% від кількості води суперпластифікатора. В якості крупного заповнювача використовувався гранітний щебінь фракції 5...20 мм, а

дрібною – кварцовий пісок із модулем крупності 1,8. В'язучим матеріалом слугував портландцемент марки М500. При розрахунку складу бетону використовувалися рекомендації наведені в роботі [3]. Армування арок – симетричне, виконувалось за допомогою плоского в'язаного каркасу, стержні робочої поздовжньої арматури – Ø10 А500С, поперечна арматура каркасу – з дроту діаметром 4 мм Вр-1 із кроком 70 мм. В якості затяжки прийняли арматурний стержень діаметром 16 мм А500С. Арки виготовляли в дерев'яно-пластиковій опалубці, бетонну суміш ущільнювали глибинним вібратором.

Випробувані у віці 28 діб в гідравлічному пресі П-250 бетонні куби мали середню міцність $f_{cm,cube} = 88,5$ МПа. Середня міцність бетонних призм у віці 28 діб і становила $f_{cm,prism} = 75$ МПа. За результатами випробування призмових зразків побудували діаграму деформування бетону при стиску (див. рис. 2). Як видно з діаграми, між напруженнями та деформаціями спостерігається практично лінійна залежність аж до руйнування. Граничне значення відносної деформації бетону стиску становило $\epsilon_{cu} = 200 \times 10^{-5}$. Можна вважати, що на всьому діапазоні навантаження призм бетон працював пружно.

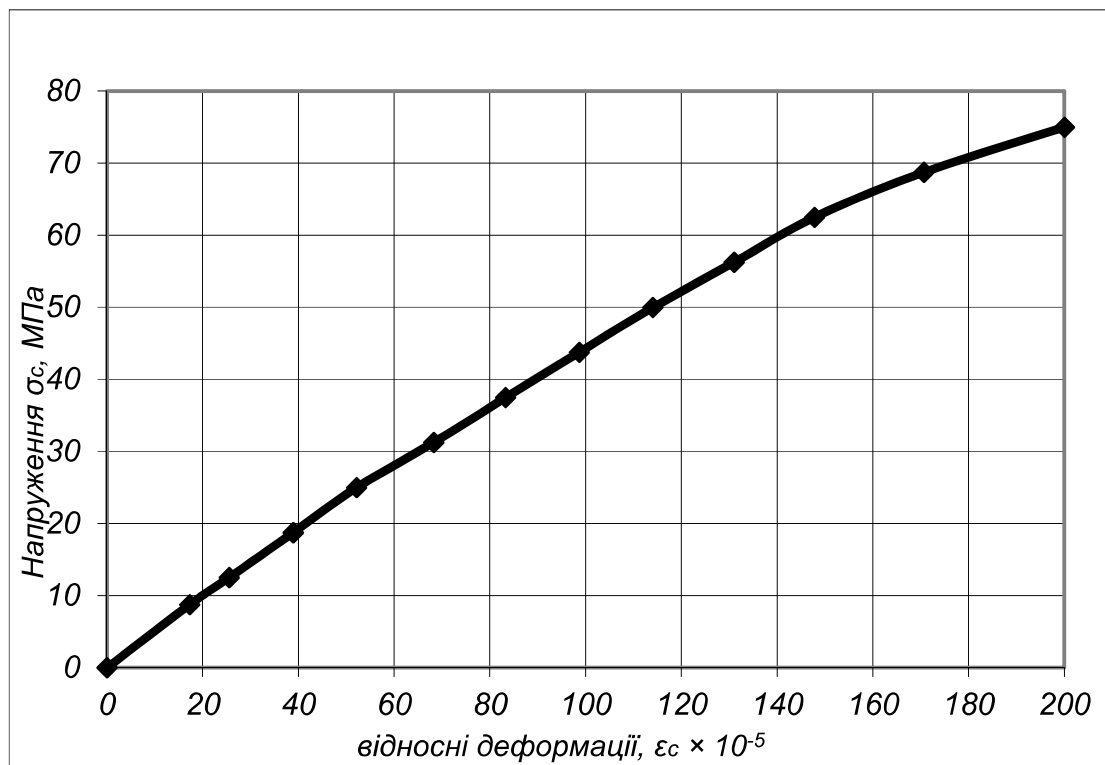


Рис. 2. Діаграма «напруження – деформації» бетону стиску призмових зразків

Механічні характеристики стержнів діаметром 10 мм класу А500С визначалися за результатами випробувань трьох зразків довжиною по 50 см в розривній машині УИМ-50. В процесі випробувань вимірялися деформації тензOMETром Гугенберґера на базі 20 мм. За результатами випробувань

встановлено, що межа текучості стержнів складає $\sigma_y = 522,3$ МПа, а межа міцності – $\sigma_u = 634,4$ МПа.

Методика досліджень. Арка А-1(2) випробовувалась в установці, змонтованій на базі гідравлічного преса УИМ-200, на дію ступеневого короточасного статичного навантаження до руйнування (див. рис. 3).

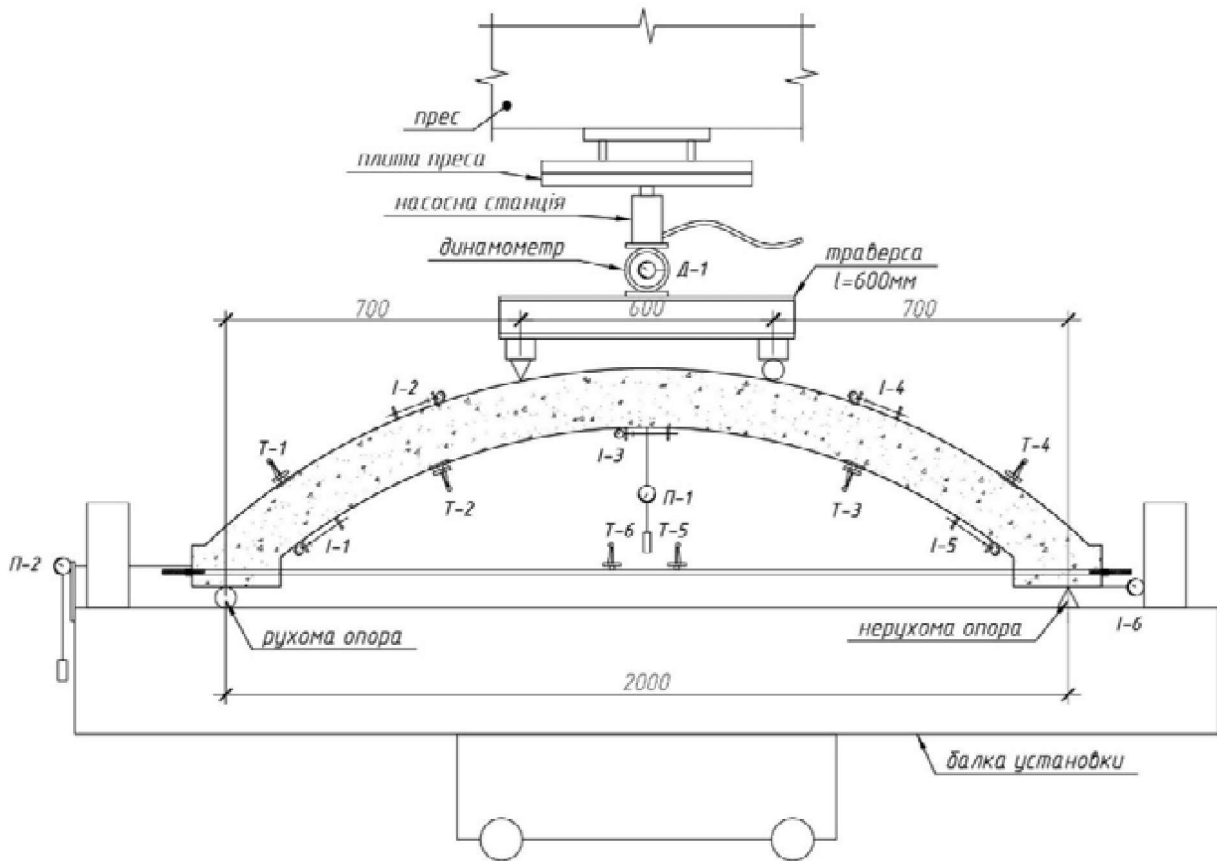


Рис. 3. Схема випробування арки А-1(2) з розміщенням вимірювальних приладів:
 Т-1, Т-2, Т-3, Т-4, Т-5, Т-6 – тензометри Гугенбергера;
 І-1, І-2, І-3, І-4, І-5 – індикатори годинникового типу 1(2)МИГ;
 І-6 – індикатор годинникового типу ИЧ-10м;
 П-1, П-2 – прогиноміри 6ПАО; Д-1 – динамометр

Навантаження арки здійснювали за допомогою гідравлічної насосної станції ступенями, величина яких складала 5 кН. Величину навантаження на ступенях контролювали попередньо протарованим у гідравлічному пресі П-250 динамометром Д-1. Використовуючи жорстку траверсу навантаження прикладали до поясу арки у вигляді двох зосереджених сил. На кожному ступені навантаження влаштовували витримку протягом 5-15 хв для зняття відліків за приладами, стабілізації деформацій у бетоні та фіксації параметрів тріщиноутворення й ширини розкриття тріщин у поясі арки. На ступенях навантаження деформації розтягу і стиску арматури й зтяжки вимірювали за тензометрами Гугенбергера на базі 20 мм з ціною поділки 0,001 мм. Деформації бетону розтягу і стиску фіксували механічними індикаторами годинникового типу 1(2)МИГ з ціною поділки 0,001(2) мм на базі в середньому 100 мм, які фіксувалися на арку за допомогою металевих

тримачів, приклеєних до бетонної поверхні епоксидним клеєм. Прогин арки вимірювали в середині прольоту за допомогою прогиноміра бПАО з ціною поділки 0,01 мм. Також за допомогою прогиноміра бПАО та індикатора годинникового типу ИЧ-10м з ціною поділки 0,01 мм вимірювали переміщення арки на двох її опорах. Загальний вигляд дослідної арки А-1(2) в установці наведений на рис. 4.

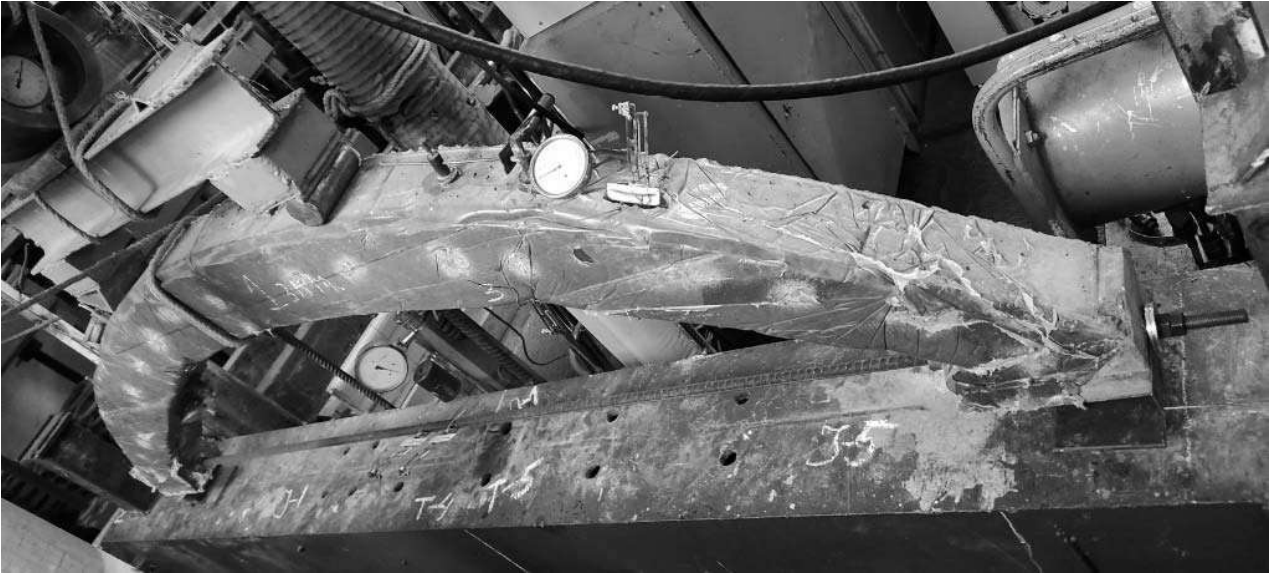


Рис. 4. Дослідна арка А-1(2) в установці

Результати досліджень. При випробуванні арки А-1(2) на ступенях навантаження фіксували деформації арматури та бетону в стиснутій і розтягнутій зонах, що дало змогу обчислити відносні деформації матеріалів та побудувати відповідні графіки залежності. Можна вважати, що до руйнування арки залежність «напруження-деформації» у стиснутому бетоні має загалом лінійний характер (див. рис. 5). Відносні деформації бетону стиску на останній ступені навантаження склали $\varepsilon_c = 36 \times 10^{-5}$, що менше граничних значень. Значні деформації бетону зафіксовані в розтягнутих зонах арки, які при руйнівному навантаженні становили $\varepsilon_{ct} = 36 \times 10^{-5}$, що значно більше граничних значень $\varepsilon_{ctu} = 10 \times 10^{-5}$. Це можна пояснити тим, що на довжині бази вимірювання індикаторів утворювались та розкривались тріщини.

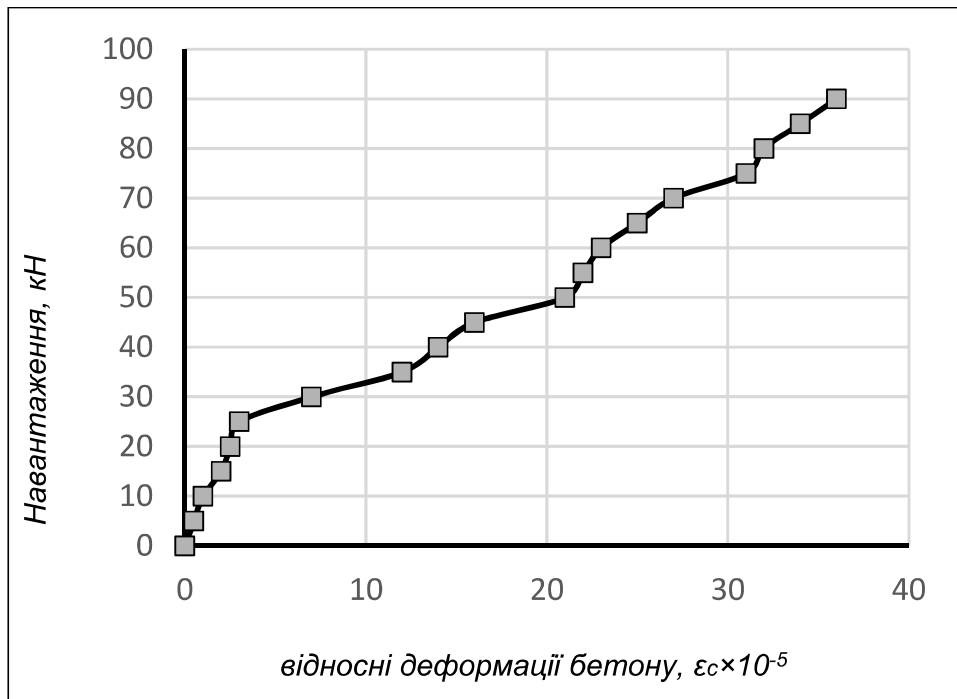


Рис. 5. Відносні деформації бетону у стиснутій зоні арки

Деформації бетону біля опори в нижній зоні арки (за індикаторами I-1 та I-5), в процесі її завантаження до руйнування, змінювали свій знак «стиск – розтяг – стиск», що пояснюється зміною обрису епюри моментів за різного рівня навантаження (див. рис. 6).

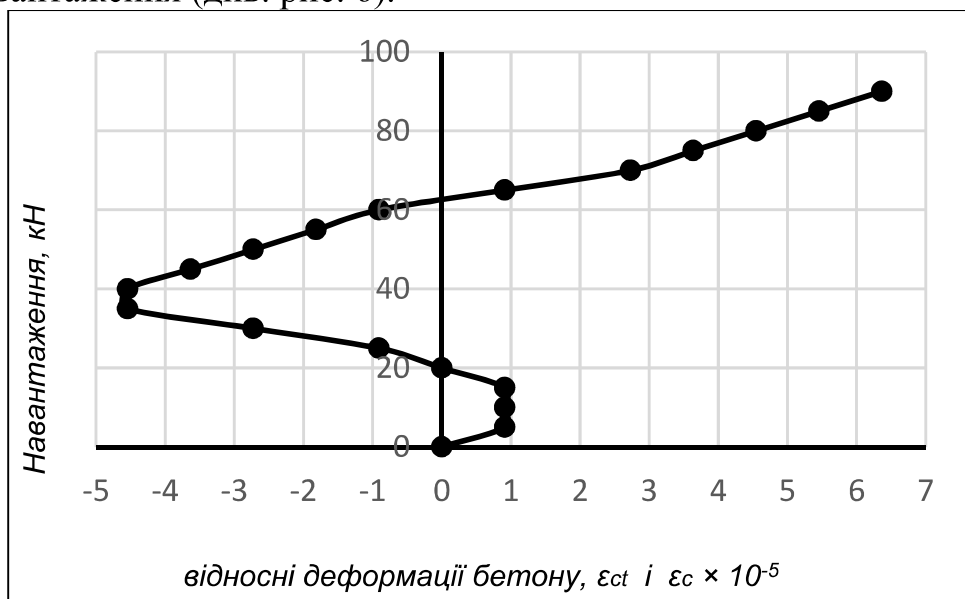


Рис. 6. Відносні деформації бетону за індикаторами I-1 та I-5

Відносні деформації у стиснутій та розтягнутій арматурі арки за руйнівного навантаження становили відповідно $\epsilon_{sc} = 65 \times 10^{-5}$ і $\epsilon_s = 85 \times 10^{-5}$, що менше значень деформацій на межі текучості сталі. Деформації розтягу арматури затяжки лінійно збільшувались залежно від навантажень (див. рис. 7). На ступені навантаження в 90 кН відносні деформації арматури розтягу

затяжки склали $\varepsilon_s = 117,5 \times 10^{-5}$, при подальшому збільшенні навантаження в арматурі затяжки була досягнута межа текучості.

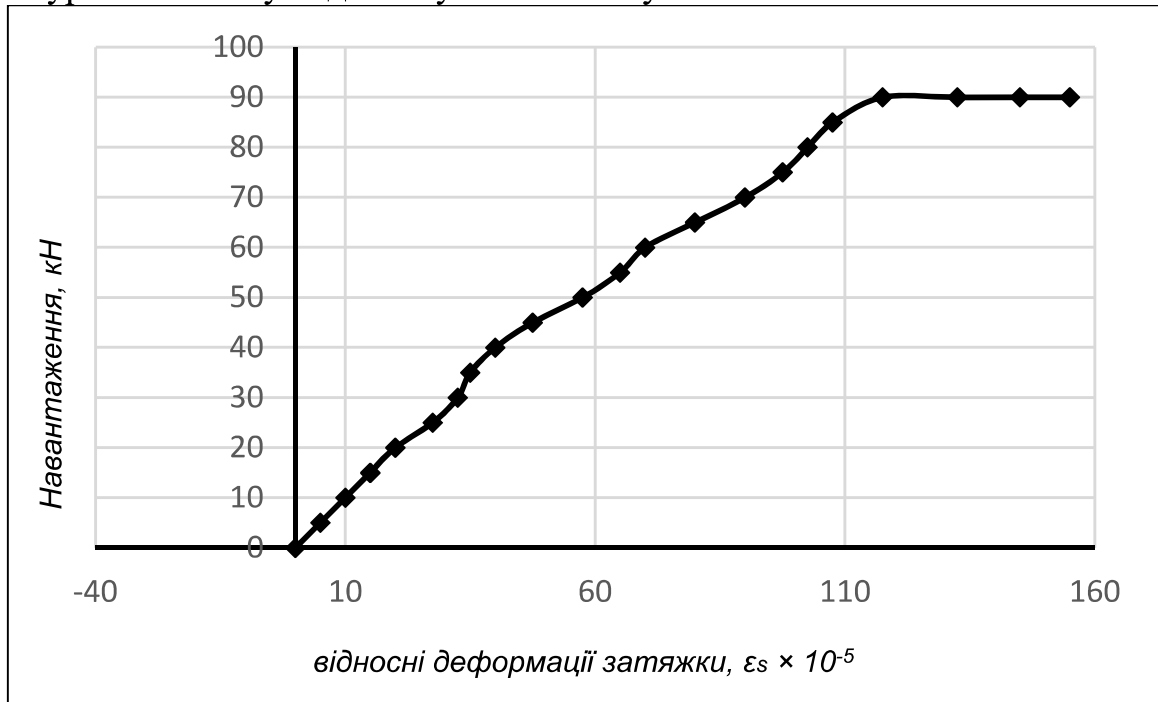


Рис. 7. Відносні деформації в затяжці арки

Прогин арки на останньому ступені навантаження становив $f = 7$ мм, залежність зміни прогину від навантажень до руйнування має чітко виражений лінійний характер (див. рис. 8). При подальшому збільшенні навантаження прогини стрімко ростуть, залежність набуває криволінійного характеру. Сумарне горизонтальне переміщення опор арки (внаслідок розпору) при руйнівному навантаженні на останньому ступені склало $\Delta = 6,4$ мм. Характер залежності «навантаження – переміщення опор» ідентичний прогинам.

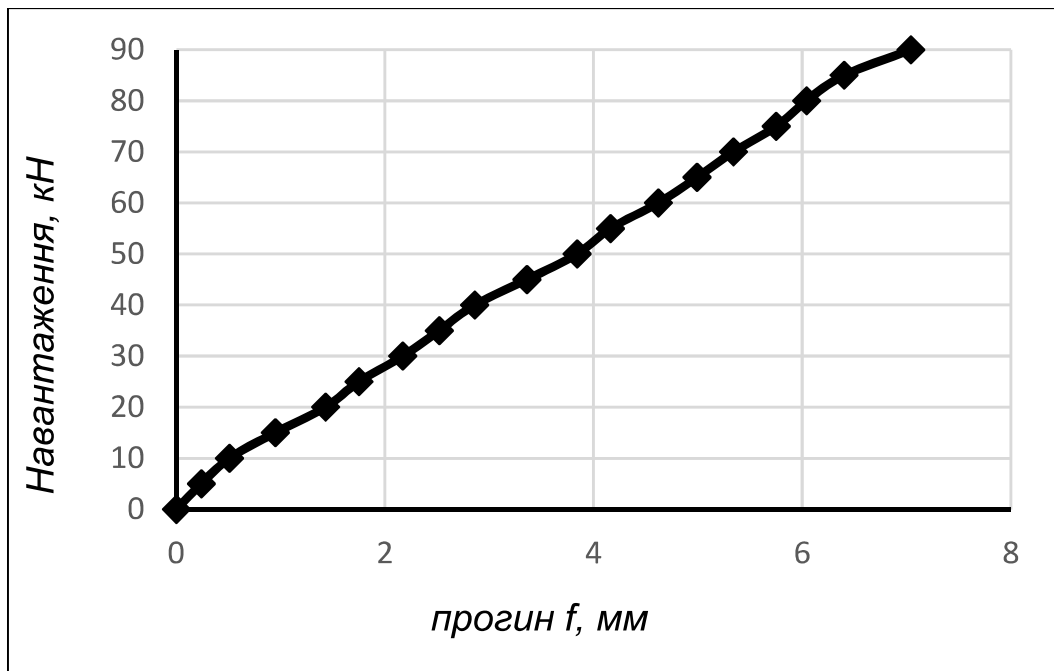


Рис. 8. Залежність прогинів від навантаження в арці А-1(2)

Перша нормальна тріщина утворилась в перерізі під зосередженою силою в нижній зоні арки на 9-му ступені при навантаженні $P=45$ кН. Ширина розкриття тріщини становила $w_k=0,06$ мм. При навантаженні $P=50$ кН утворилась нова тріщина у нижній зоні в прольоті арки між зосередженими силами. З кожним ступенем, до навантаження в $P=70$ кН, утворювались нові нормальні тріщини у нижній зоні поясу арки (див. рис. 9). При навантаженні $P=55$ кН ширина розкриття характерної (критичної) тріщини становила $w_k=0,2$ мм, при навантаженні $P=70$ кН ширина розкриття тріщини склала $w_k=0,25$ мм, при навантаженні $P=90$ кН ширина розкриття тріщини становила $w_k=0,4$ мм.



Рис. 9. Характер тріщиноутворення у поясі арки А-1(2)

Руйнівне навантаження для арки А-1(2) за результатами експериментальних досліджень становило $P_u = 90$ кН. На 18-му ступені навантаження при $P_u = 90$ кН прогин та ширина розкриття тріщин у поясі арки досягли граничних значень. Нормальні наскрізні тріщини розбили пояс на окремі блоки, він втратив жорсткість (рис. 9). При намаганні, за допомогою насосної станції, збільшити навантаження після 18-ї ступені, покази динамометра Д-1 не змінювалися, але спостерігали суттєвий (стрибкоподібний) приріст прогинів (максимальний зафіксований $f = 14$ мм), сумарного переміщення опор – до $\Delta = 13$ мм, ширини розкриття тріщин – $w_k = 1,1$ мм. Також зафіксували збільшення деформацій у розтягнутій зоні бетону (по індикатору І-3) у 6,5 разів, за рахунок розкриття тріщин в межах бази індикатора. При цьому деформації бетону стиску (індикатори І-2 та І-4) збільшились в 1,5 рази. Деформації розтягу в затяжці, за рахунок зусиль розпору, досягли межі текучості.

1. Бабич Є. М., Кислюк Д. Я. Моделивання напружено-деформованого стану двохшарнірних залізобетонних арок в ПК «Ліра» // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. Рівне: НУВГП. 2011. Випуск 21. С. 115–120.

Babych Ye. M., Kysliuk D. Ya. Modeliuvannia napruzhenno-deformovanoho stanu dvokhsharnirnykh zalizobetonnykh arok v PK «Lira» // Resursoekonomni materialy,

konstruktsii, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats. Rivne: NUVHP. 2011. Vypusk 21. S. 115–120.

2. Бабич Є. М., Кочкаръов В. Д., Філіпчук С. В., Караван Б. В. Конструктивні рішення та розрахунок елементів захисних споруд цивільного захисту з залізобетонними арочними покриттями // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. Рівне: «Волинськіобереги».2021. Випуск 39. С. 162–176.

Babych Ye. M., Kochkarov V. D., Filipchuk S. V., Karavan B. V. Konstruktyvni rishennia ta rozrakhunok elementiv zakhysnykh sporud tsyvilnoho zakhystu z zalizobetonnyu arochnymu pokryttiamy // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats. Rivne: «Volynski oberehy».. 2021. Vypusk 39. S. 162–176.

3. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони/Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В. та інші. Рівне: НУВГП. 2017.331 с.

Vysokomitsni shvydkotverdnuchi betony ta fibrobetony/Dvorkin L. Y., Babych Ye. M., Zhytkovskyi V. V. ta inshi. Rivne: NUVHP. 2017. 331 s.

4. Караван Б.В. Експериментальні дослідження напружено-федормованого стану залізобетонних арок з високоміцного бетону// Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. Рівне: НУВГП. 2022. Випуск 41. С. 135–143.

Karavan B.V. Eksperymentalni doslidzhennia napruzhenno-fedormovanoho stanu zalizobetonnykh arok z vysokomitsnoho betonu// Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats. Rivne: NUVHP. 2022. Vypusk 41. S. 135–143.