

624.012.25

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-  
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРОК  
З ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRESSED AND DEFORMED STATE  
OF REINFORCED CONCRETE ARCHES  
OF HIGH STRENGTH CONCRETE**

**Караван Б. В.,** аспірант, ORCID ID: 0000-0002-0492-7544

(Національний університет водного господарства та природокористування)

**Karavan B.,** postgraduate student, ORCID ID: 0000-0002-0492-7544

(National University of Water Management Nature Resources Use)

Наразі при зведені будівель і споруд розширюється використання залізобетонних арок, зокрема для споруд фортифікаційного призначення та для будівель цивільного захисту. Особливо привертають увагу арки, які виготовляються з високоміцного бетону, що сприяє зменшенню ваги конструкцій та навантажень на інші конструктивні елементи будівель, фундаменти та основи. Але дослідження особливостей роботи таких арок під навантаженням на сьогодні практично відсутні. В статті наводяться результати експериментальних досліджень моделей арок, виготовлених з високоміцного бетону.

Currently, the use of reinforced concrete arches is expanding during the construction of buildings and structures, in particular for fortifications and for civil defense buildings. Particularly noteworthy are the arches, which are made of high-strength concrete, which helps to reduce the weight of structures and loads on other structural elements of buildings and foundations. But studies of the peculiarities of the work of such arches under load today are virtually absent.

The article presents the results of experimental studies of the stress-strain state of models of arches made of high-strength concrete, the cup strength of which exceeded 60 MPa. The construction of arches with a design span of 2 m and a lifting boom of 0.4 m is described. The cross section of the arches was 0.14 × 0.10 m. The arches were reinforced with a flat frame with longitudinal reinforcement from 2Ø10 A500C rods.

Two arches were tested by applying a load of two concentrated forces according to the scheme of pure bending of the beam. The supports of the arches were hinged. The load in a special installation was applied in stages. The magnitude of the concentrated forces and the gap was measured using rammed jacks. Load processes measured deformations of concrete, reinforcement and

deflections in the middle of the arch. Tens meters, indicators and prognometers were used for this purpose.

Cubes and prisms were made to establish the mechanical characteristics of concrete and tested according to standard methods. Chemical additives were introduced into the concrete. According to the results of testing concrete and reinforcing samples, their mechanical characteristics were established, which were used in the theoretical determination of the bearing capacity of arches.

Experimental studies of high-strength concrete arches allowed the length of the arches and establish the nature of the destruction of the arches. The theoretically determined values of the destructive forces according to the deformation technique using a two-line diagram of concrete deformation satisfactorily coincide with the experimental data.

**Ключові слова:** залізобетонні арки, високоміцний залізобетон, випробування, аналіз, дослідження.

reinforced concrete arches, high-strength concrete, tests, analysis, research.

**Вступ.** Залізобетонні арки широко використовуються для покриття промислових та цивільних будівель, а також при зведенні мостів, автодорожніх переходів тощо. Як правило арки застосовують великих прольотів (18 м і більше).

Особливо ефективні арочні покриття для захисних споруд при використанні для їх виготовлення високоміцних бетонів. Але дослідження напружено-деформованого стану арок з високоміцного бетону на дію навіть статичних навантажень практично відсутні, що стримує розширення їх використання. Також відсутні рекомендації щодо теоретичного визначення їхньої несучої здатності. З огляду на наведене, дослідження напружено-деформованого стану арок з високоміцного бетону є актуальною задачею. Вирішенню цих задач присвячена ця стаття.

**Аналіз останніх досліджень.** Інформації про дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних арок дуже обмежена кількість. Можна відмітити дослідження, які були виконані в Луцькому національному технічному університеті [1]. Експеримент виконано з трьома арками прольотом 2,0 м, які були виготовлені з бетону класу C16/20 та армовані стержнями діаметром 10 мм класу A500C.

В досліді 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 та величина руйнуючих зусиль. Для теоретичного визначення несучої здатності арок виконано числовий експеримент за допомогою програмного комплексу «Ліра 9.0».

На підставі виконаних досліджень в роботі [1] зроблено висновок, що моделювання напружено-деформованого стану арок в ПК «Ліра» з урахуванням дійсних механічних характеристик матеріалів в повній мірі відображає реальну роботу конструкції і дозволяє отримати реальні епюри напружень в стиснутій зоні бетонного перерізу. Треба зазначити, 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.

**Постановка мети і задач досліджень.** В дослідженнях поставлено за мету шляхом виконання в лабораторних умовах випробування під статичним навантаженням моделей залізобетонних арок, виготовлених із високоміцного бетону, встановити зміну напружено-деформованого стану перерізів криволінійного поясу арок і характер їх руйнування та запропонувати метод теоретичного визначення руйнівного зусилля. Для досягнення мети поставлені такі завдання:

- розробити конструкцію та виготовити дослідні зразки, використавши для цього високоміцний бетон (з міцністю на стиск вищу за 50 МПа);
- розробити методику експериментальних досліджень та виконати випробування дослідних зразків;
- виконати аналіз експериментальних даних;
- сформулювати висновки і рекомендації.

**Дослідні зразки та матеріали для їх виготовлення.** Для виконання експериментальних досліджень виготовляли основні дослідні зразки у вигляді двохшарнірних залізобетонних арок з високоміцного бетону 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 (рис. 1). Всього було виготовлено дві залізобетонні арки, шість бетонних кубів з розміром ребра 15 см та три бетонні призми з розмірами  $15 \times 15 \times 60$  см.

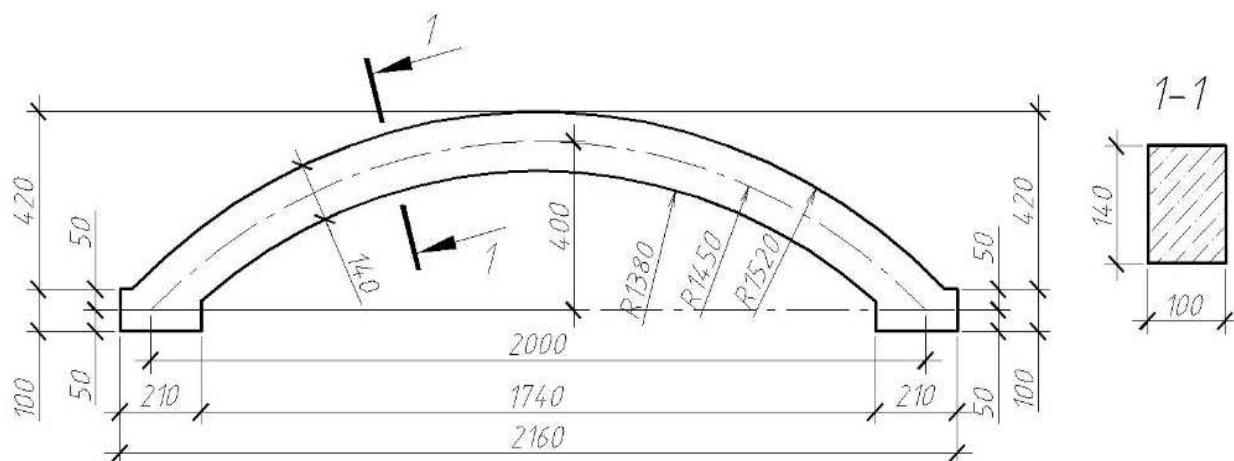


Рис. 1. Опалубне креслення дослідних зразків арок (розміри в мм)

Бетон виготовлявся за складом 1:1,70:1,36 при В/Ц = 0,2 з добавкою 10% від кількості води суперпластифікатора. В якості крупного заповнювача використовувався гранітний щебінь фракції 5 – 20 мм, а дрібного – кварцовий пісок із модулем крупності 1,8. В'язучим матеріалом слугував цемент марки М500. При розрахунку складу бетону використовувалися рекомендації наведені в роботі [3].

Армування арок виконувалось за допомогою плоского в'язаного каркасу, який складався з двох стержнів арматури Ø10А500С та поперечної арматури Вр-1 діаметром 4 мм з кроком 140 мм. (рис. 2). Так як арки передбачалося можливе влаштування затяжками, в опорних ділянках закладались металеві труби з внутрішнім діаметром 14 мм.

Арки виготовлялися в дерев'яній опалубці (рис. 2). Бетонна суміш ретельно ущільнювалася глибинним вібратором. Бетонні куби і призми формували в стандартних металевих формах з ущільненням суміші на спеціальному стенді. Після вкладання та ущільнення бетону форми з арками покривалися тканиною, яка періодично зволожувалася водою. Через три доби зразки виймали з форм. Після цього вони покривалися тканиною і зволожувалися на протязі 14 діб. Через три доби після бетонування виймалися з форм призми та куби і продовжували твердіти зі зволоженням.

Випробувані бетонні куби у віці 1 доби мали середню міцність  $f_{cm,cube} = 39,1$  МПа, а безпосередньо перед випробуванням арок (у віці 28 діб) –  $f_{cm,cube} = 76,1$  МПа. Високе значення мала середня міцність бетонних призм перед випробуваннями арок і складало  $f_{cm,prism} = 53,7$  МПа. При випробуванні призм поздовжні деформації у бетоні вимірювали індикаторами з ціною поділки 0,001 мм, що дало можливість побудувати діаграму деформування бетону при стиску (рис. 3).



Рис. 2. Залізобетонна арка в процесі виготовлення

Як видно з діаграми, між напруженнями і деформаціями спостерігається практично лінійна залежність аж до руйнування. Так при напруженнях  $\sigma_c = 21,5$  МПа деформації склали  $\epsilon_c = 61,2 \times 10^{-5}$  (початковий модуль пружності бетону склав  $E_c = 35465$  МПа), а при  $\sigma_c = 51,9$  МПа деформації склали  $\epsilon_c = 198,3 \times 10^{-5}$  (січний модуль пружності бетону –  $E_c = 32476$  МПа). За таких деформаційних характеристик (коефіцієнт пружності бетону складає 0,92) можна вважати, що на всьому діапазоні навантаження призм бетон працював як пружний матеріал.

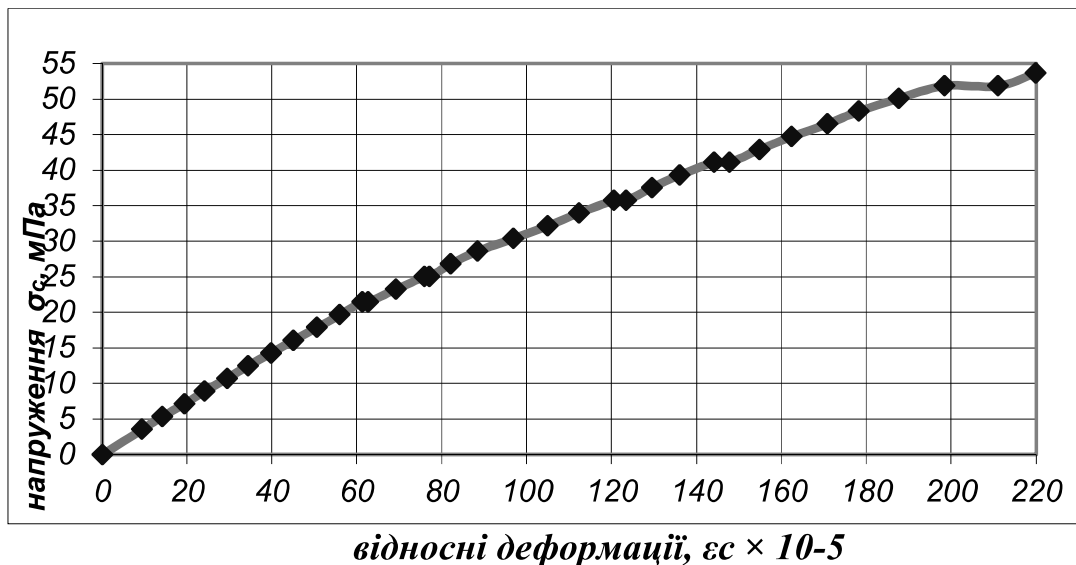


Рис. 3. Діаграма «напруження-деформації» бетону при стиску

Механічні характеристики стержнів діаметром 10 мм класу А500с визначалися за результатами випробувань трьох зразків довжиною по 65 см в розривній машині УИМ-50. В процесі випробувань вимірялися деформації тензометром Гугенбергера на базі 20 мм. За результатами випробувань встановлено, що межа текучості стержнів складає  $\sigma_y = 522,3$ , а межа міцності –  $\sigma_u = 634,4$  МПа.

**Методика досліджень.** Залізобетонна арка А-1 (без затяжки) з розрахунковою довжиною 200см випробовувалась на дію статичного

навантаження до руйнування за схемою балки на двох опорах при чистому згині. Випробувальна установка змонтована на базі гідравлічного преса УИМ 200 (рис.4)

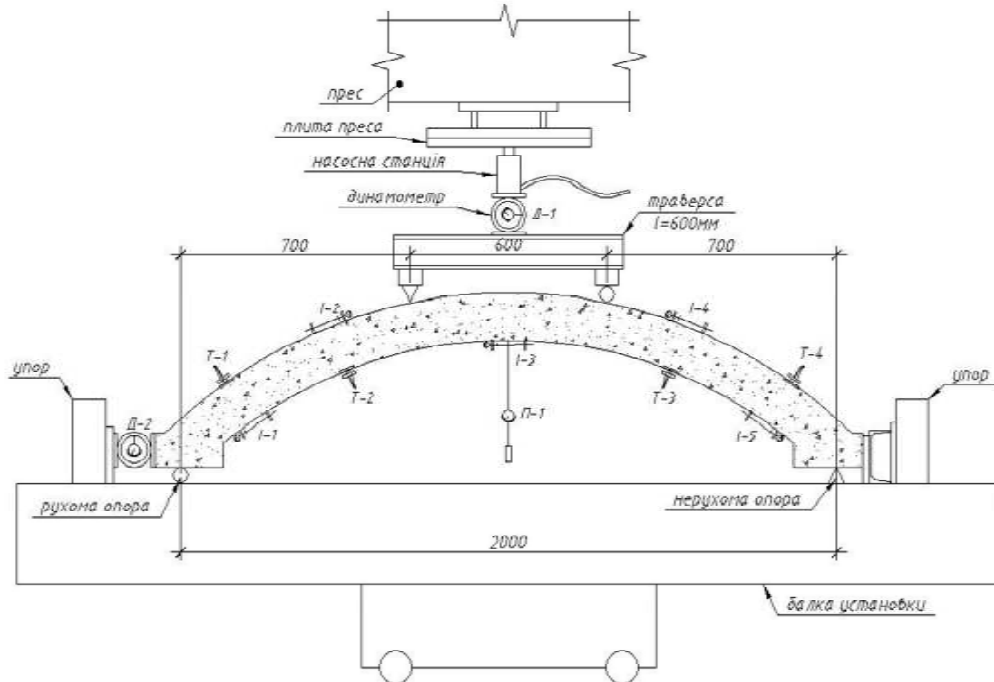


Рис .4. Схема випробування арки А-1: Т-1, Т-2, Т-3, Т-4 – тензометр Гугенбергера; І-1, І-2, І-3, І-4, І-5 – індикатор годинникового типу 1МІГ;

Навантаження арки здійснювалось ступенями, величина яких складала 5кН. На кожному ступені навантаження робились витримки протягом 5-7 хв задля стабілізації деформацій в бетоні та зняття відліків за приборами . Також на кожному ступені робились візуальні огляди арки на наявність тріщин та ширину їх розкриття.

В процесі навантаження деформації арматури вимірювали за допомогою тензометрів Гугенбергера на базі 20 мм. Деформації бетону фіксувалися індикаторами годинникового типу 1МІГ на базі 100 мм, які кріпилися до арки за допомогою металевих тримачів, які приклеювалися до їхньої поверхні епоксидним клеєм. Прогини арок вимірювалися за допомогою прогиноміра 6ПАО, який розміщувався в проміжку між зосередженими силами в середині арки. Загальний вигляд випробування арки А-1 наведений на рис. 5.

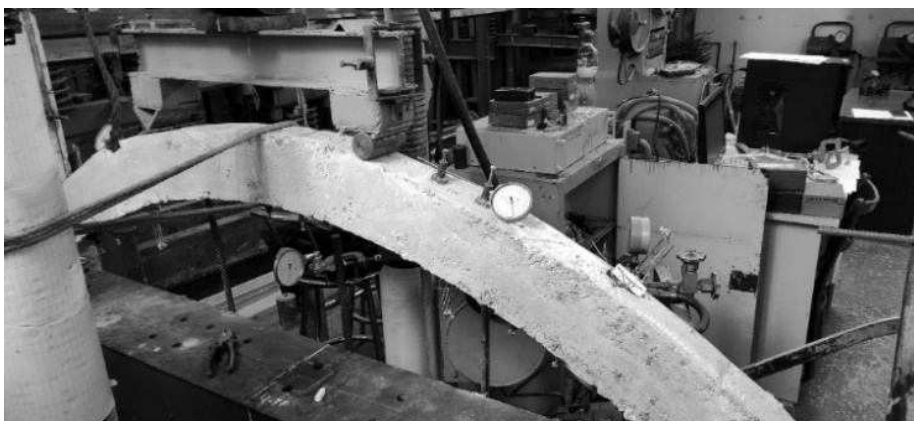


Рис.5. Загальний вигляд арки А-1 перед випробуванням

Арку А-2 планувалося випробувати, влаштувавши в ній затяжку для сприйняття розпору. Але при середньому навантаженні затяжка вийшла з ладу, вона була розвантажена, після чого влаштували нерухомі опори і продовжили її випробування як арки А-1.

**Результати досліджень.** При випробуванні арки А-1 на віддалі від опори 35 та 68 см замірялися деформації арматури і бетону в стиснутій і розтягнутій зонах, що дало змогу обчислити відносні деформації матеріалів та побудувати відповідні графіки (рис. 6 і рис. 7). Прилади, що розташовувалися на віддалі 68 см від опор, були встановлені поряд з точками прикладання зосереджених сил і знаходилися практично в перерізі з максимальними згинальними моментами.

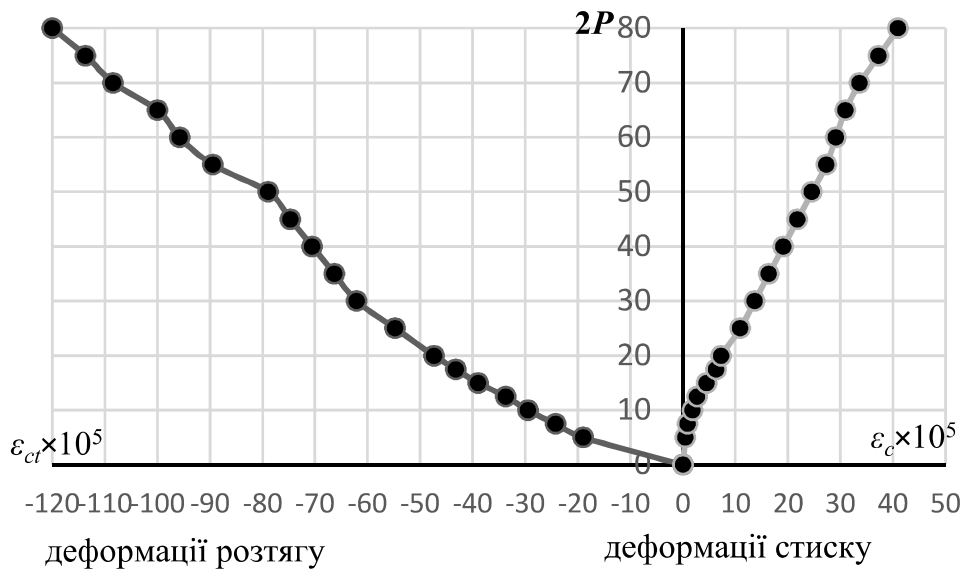


Рис. 6. Деформації бетону в розтягнутій і стиснутій зоні арки А-1

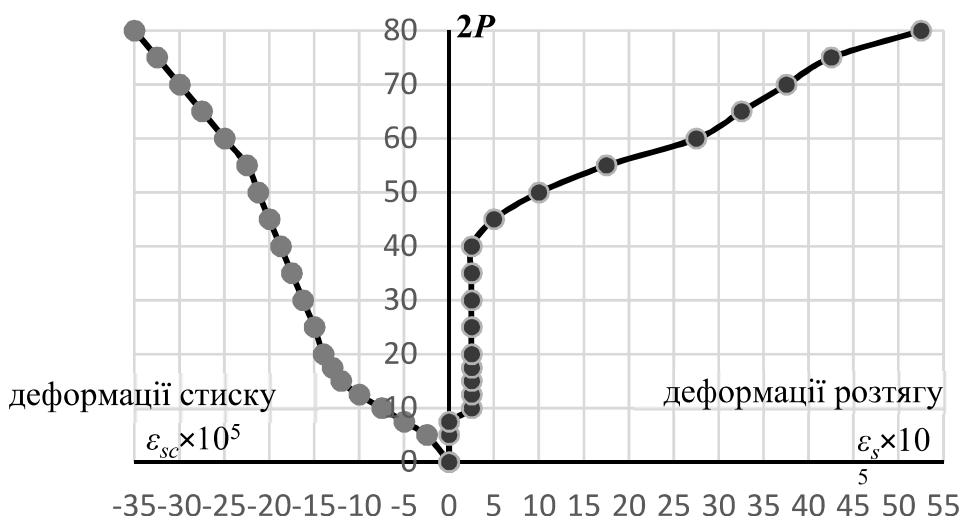


Рис.7. Деформації розтягнутої і стиснутої арматури в арці А-1

З графіка на рис. 6 видно, що бетон в стиснутій зоні деформувався лінійно до навантаження. При значенні навантаження  $P = 40$  кН деформації в крайній стиснутій фібрі бетону склали  $\varepsilon_c = 49,9 \times 10^{-5}$ . Після навантаження  $2P = 80$  кН прилади з арки були зняті з метою їх збереження, а тому деформації бетону безпосередньо перед руйнуванням заміряти не вдалося.

Значні деформації бетону зафіксовані в розтягнутій зоні арки, що можна пояснити тим, що в базі вимірювання деформацій індикатором виникали мікротріщини, а потім і макротріщини. При навантаженні  $2P = 80$  кН такі деформації склали  $\varepsilon_{ct} = 120,8 \times 10^{-5}$  (рис. 6).

На перших ступенях навантаження деформації в розтягнутій арматурі збільшувалися, але після навантаження  $2P = 40$  кН вони почали помітно збільшуватися і при  $2P = 80$  кН досягли значення  $\varepsilon_s = 52,5 \times 10^{-5}$ . В стиснутій арматурі деформації зростали повільно і, практично, лінійно збільшувалися зі збільшенням навантаження (рис. 7).

Розпір  $H$  в арці А-1 зростав пропорційно навантаженню і при навантаженні  $2P = 80$  кН склав  $H = 45,9$  кН. Зруйнувалася арка при навантаженні  $2P_u = 105$  кН внаслідок розкриття тріщини поряд з точкою прикладання зовнішньої сили та руйнування стиснутої зони бетону (рис. 8). Якщо врахувати те, що значення розпору  $H$  практично лінійно залежить від величини зовнішнього навантаження, то значення розпору, яке відповідає руйнуючому зусиллю  $2P_u$  можна прийняти рівним  $H = 60,2$  кН.

Напружено-деформований стан арки А-2, не дивлячись на зміну схеми випробування в процесі навантаження, практично змінювався аналогічно як в арці А-1. Арка випробувалася до навантаження  $2P = 100$  кН, а руйнування арки відбулося при  $2P_u = 104$  кН, при цьому характер руйнування аналогічний характеру руйнування арки А-1. Враховуючи лінійну залежність розпору від навантаження, величина розпору в арці А-2, яке відповідає руйнуючому навантаженню, склала  $H = 55,9$  кН, що на 7,1 % відрізняється від значення розпору в арці А-1. Тобто, можна вважати, що арки однорідні.



Рис. 8. Характер руйнування арки А-1

**Висновки та рекомендації.** Отримані дані експериментальних досліджень свідчать, що напружено-деформований стан перерізів по довжині



арки суттєво змінюється. Так в опорному перерізі не виникає згинальний момент і можна вважати, що цей переріз рівномірно стиснутий. Зі зміною відстані від опори в перерізах діє згинальний момент, який спричиняє розтяг у верхній частині перерізу арки, а в середній частині арки (між точками прикладання зосереджених сил) діють згинальні моменти, що спричиняють розтяг в нижній частині перерізу арки. Найбільший згинальний момент має місце в перерізах, де прикладені сили, а найбільша поздовжня сила – в опорному перерізі. З огляду на це, можна заключити, що пояс арки працює як стиснуто-зігнутий елемент. Необхідно рекомендувати в подальшому розробити методику розрахунку поясу арки з високоміцного бетону на основі встановленого напружено-деформованого стану.

1. Бабич Є. М., Кислюк Д. Я. Моделювання 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, konstruktssii, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats. Rivne: NUVHP. 2011. Vypusk 21. S. 115–120.

2. Бабич Є. М., Кочкар'ов 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: «Волинські береги». 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, konstruktssii, 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. ДБН В.2.6–98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції: основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України. 2011. 71 с.

DBN V.2.6–98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktssii: osnovni polozhennia. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. 2011. 71 s.

5. ДСТУ Б В.2.6–156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону: правила проектування. Київ: Мінрегіонбуд України. 2011. 118с.

DSTU B V.2.6–156:2010. Betonni ta zalizobetonni konstruktssii z vazhkoho betonu: pravyla proektuvannia. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. 2011. 118s.

6. Проектування залізобетонних конструкцій: посібник/Бамбура А. М. та інші. Київ. 2018. 240 с.

Proektuvannia zalizobetonnykh konstruktssii: posibnyk/Bambura A. M. ta inshi. Kyiv. 2018. 240 s.