

## **ЗМІНА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ В ДВОХШАРНІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРКАХ З ПОПЕРЕДНІМ НАТЯГОМ ЗАТЯЖКИ ПРИ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

*Наведені результати дослідження роботи арок при різних режимах одноразового та малоциклового навантаження з натягом затяжки. Наведено методику розрахунку двохшарнірних залізобетонних арок із врахуванням перерозподілу зусиль при повторних навантаженнях.*

*There are new experimental data of two-hinged reinforced arches by the action of short-time and repeated loadings which perfected the methods of its calculation. Pre-stressing tightening reduces the maximal bending moment by 30% in the arch sections, which helps to reduce deflection and increase fracture arch.*

**Вступ.** Залізобетонні арки широко використовуються в складі поперечних рам виробничих будівель, в різних спеціальних спорудах. Під час експлуатації арки, як і інші будівельні конструкції можуть піддаватися повторним малоцикловим навантаженням, які можуть впливати на зміну механічних характеристик матеріалів, перерозподіл зусиль між елементами арок тощо [1, 2]. В останні тридцять років дослідженням роботи арок увага не приділялася, а як показали експериментальні дослідження двохшарнірних та замкнутих залізобетонних рам, повторні навантаження суттєво впливають на прогини ригелів, ширину розкриття тріщин, внутрішній напружено-деформований стан тощо [2,3].

З огляду на наведене, поставлено задачу експериментально встановити особливості роботи двохшарнірних арок при дії на них повторних малоциклових навантажень з регулюванням зусиль і без, та порівняти їх з розрахунковими результатами.

Залізобетонні двохшарнірні (статично невизначені) арки розраховують як пружні системи, приймаючи, що бетон і арматура під навантаженням

працюють як абсолютно пружні матеріали, а в самих арках у розтягнутих зонах тріщини не утворюються. Розрахунок виконують методом сил (рис. 1):

$$X_1 \cdot \delta_{11} + \Delta_{1F} = 0, \quad (1)$$

Перерозподіл зусиль в статично невизначених залізобетонних конструкціях враховують на основі методу граничної рівноваги, в якому конструкцію розглядають як складену з окремих жорстких дисків, з'єднаних між собою пластичними шарнірами. Зусилля в арці можна перерозподілити таким чином, щоб отримати найбільший техніко-економічний ефект. З точки зору статичного розрахунку це рівноцінно множенню епюр згинальних моментів від зайвих невідомих на довільний коефіцієнт або додаванню до епюри моментів від зовнішнього навантаження, визначених за пружною роботою арок, додаткових епюр перерозподілу (рис. 2).

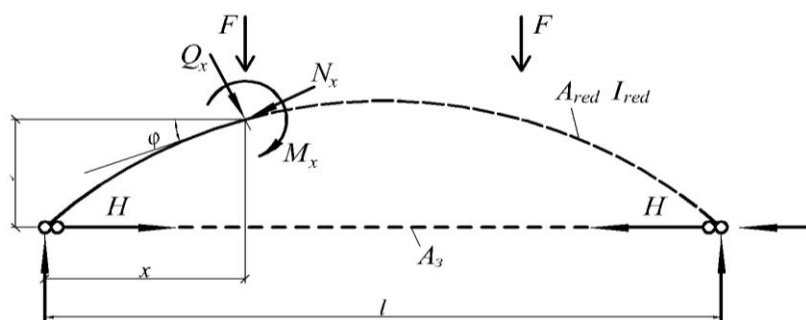


Рис. 1. Розрахункові схеми двохарнірної арки

В двохарнірних арках перерозподіл зусиль відбувається в перерізах верхнього поясу арки і затяжці. Штучне регулювання зусиль, відбувається шляхом попереднього напруження затяжки, що дає змогу вплинути на перерозподілу зусиль[4].

Розрахунок зусилля попереднього натягу затяжки:

$$\Delta H = \frac{M_{s1} - M_{s2}}{y_1 + y_2} \quad (4)$$

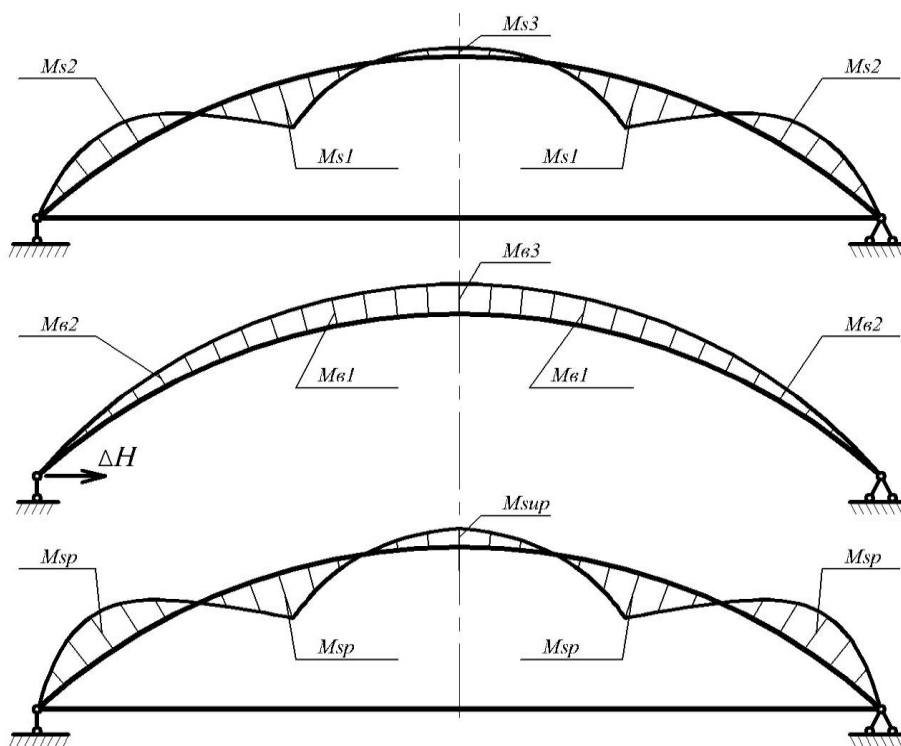


Рис. 2. Перерозподіл згинальних моментів в перерізах двошарнірної арки

Внаслідок перерозподілу зусиль максимальні значення згинальних моментів під зосередженими силами та протилежні значення моментів виявились однаковими. Це дає змогу більш економічно використати симетричне армування по всьому перерізу, знизити трудомісткість виготовлення конструкцій, покращити якість конструкцій.

На основі досліджень в будівельній лабораторії ЛуцькогоНТУ дійсної роботи двохшарнірної залізобетонної арки із затяжкою при дії повторного навантаження було вирішено детальніше дослідити вплив попереднього натягу затяжки на зусилля які виникають в арці. Було випробувано залізобетонні двохшарнірні арки, які мали загальну довжину 2160 мм зі стрілою підйому 40 см та поперечний переріз 100×140 мм [5,6].

Робота арок вивчається в гідравлічному пресі, обладнаному спеціальними траверсами. Арки випробовувалися як вільно оперті з розрахунковим прольотом  $l=200$  см. Навантаження прикладувалося у вигляді зосереджених сил

на відстані 40 см від осі симетрії арки через траверсу гідравлічним пресом (рис. 3) [5,6].

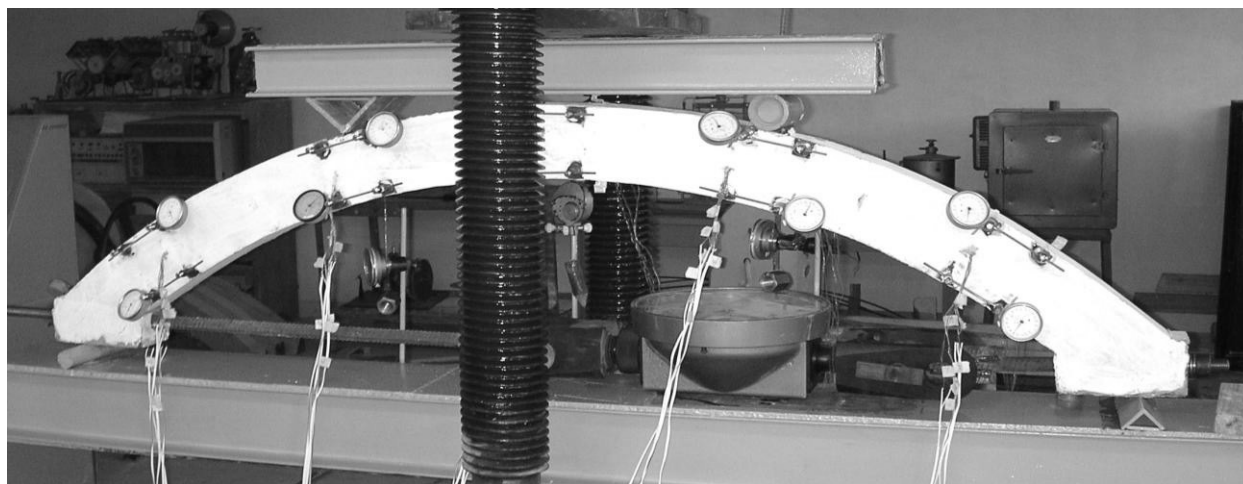
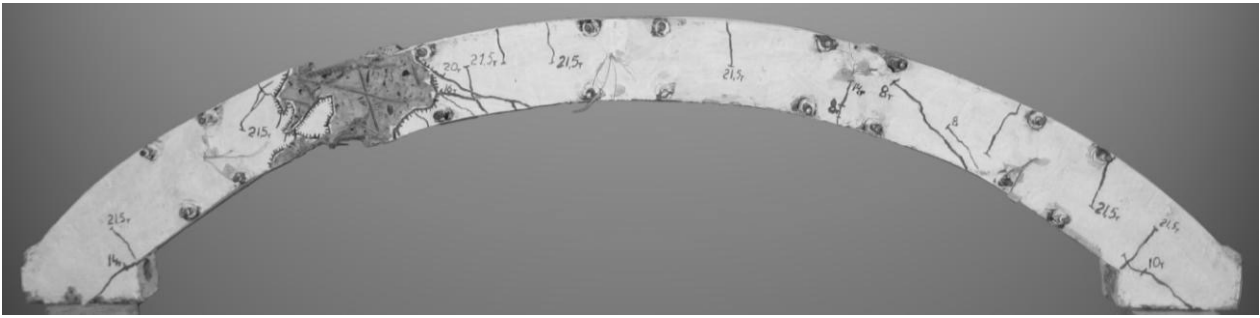
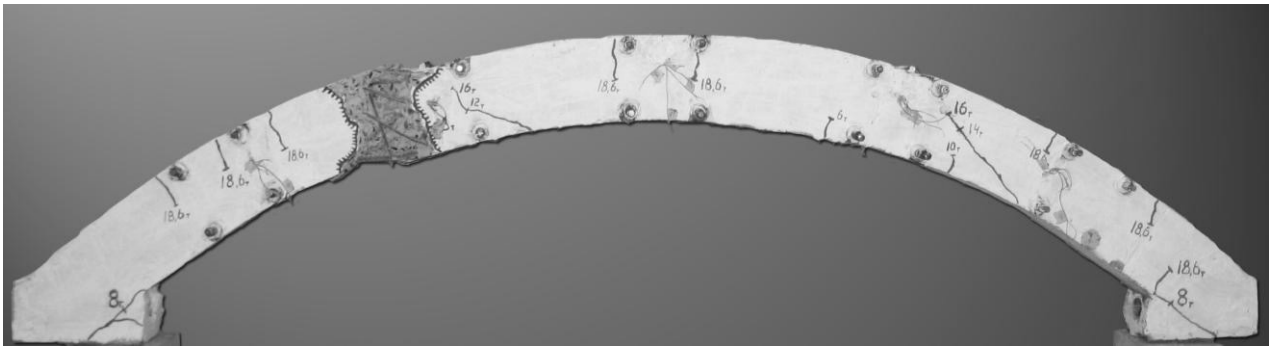


Рис.3. Схема випробування арки

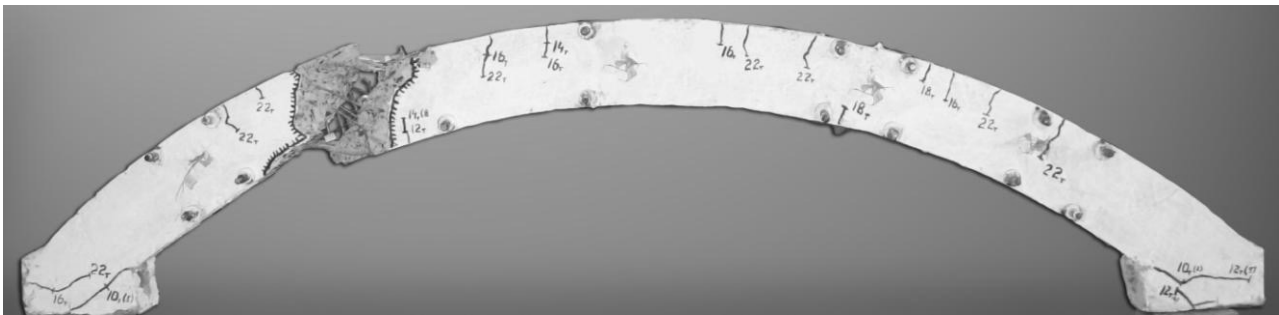
Результати експериментальних досліджень. Арка 2А-1 випробовувалась одноразовим монотонним навантаженням до руйнування, яке відбулося внаслідок роздроблення бетону на ділянці прикладання навантаження, рівного склала  $F_u = 106,5$  кН. Арка 2А-2 також випробовувалась одноразовим навантаженням до руйнування, однак на відміну від першої в роботу арки включали попереднє напруження зтяжки. Значення додаткового зусилля визначали за допомогою розрахунку із врахуванням перерозподілу зусиль, яке становило  $\Delta H = 8$  кН. Руйнівне навантаження в арці 2А-2 склало  $F_u = 98,0$  кН. Арки 2А-3 і 2А-4 піддавали десятикратному мало цикловому навантаженню, також з попереднім напруження зтяжки. Для арки 2А-3 руйнівне навантаження склало  $F_u = 100,8$  кН, а для арки 2А-4 –  $F_u = 109,5$  кН. Арки руйнувалися в зоні дії максимального згинального моменту внаслідок роздроблення та зрізу стиснутого бетону (рис. 4) [6].



Арка 2А-1



Арка 2А-2



Арка 2А-4

Рис. 4. Характер руйнування арок другої серії

Попереднє напруження затяжки в арці 2А-2 дозволило перерозподілити зусилля в перерізах арки та зменшити згинальні моменти на 27,7% .

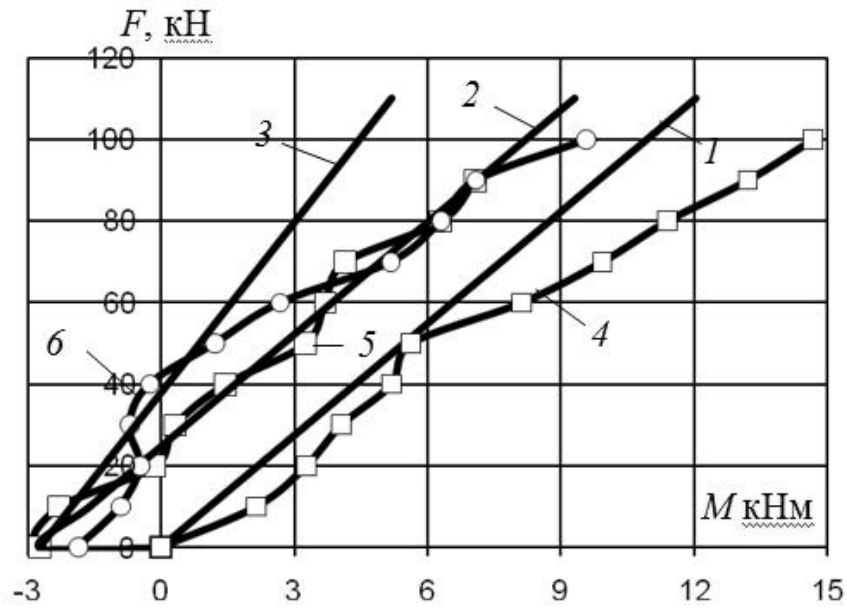


Рис. 5. Зміна згинальних моментів  $M$  при повторних навантаженнях арок другої серії: 1 – теоретичне при  $k_{th} = 0,928$ ; 2 – теоретичне при  $k_{th} = 0,928$  з  $\Delta H = 8$  кН; 3 – теоретичне при  $k_{th} = 1,0$  з  $\Delta H = 8$  кН; 4 – в арці 2А-1; 5 – в арці 2А-2; 6 – середнє для арок 2А-3 і 2А-4

Значення згинальних моментів в арці 2А-2 з невеликим відхиленням відповідає теоретичним значенням. Після дії повторних навантажень в арках 2А-3 2А-4 моменти зменшуються до пружних значень, а на стадії руйнування збільшуються до теоретичних значень (працюють як арки першої серії) (рис.5).

В арках 2А-3 і 2А-4 попередні повторні навантаження вплинули на характер зміни зусилля в зтяжках на циклі навантаження до руйнування. На перших ступенях навантаження попередній натяг зтяжки збільшив напруження на  $\Delta H = 8,0$  кН, що привело до збільшення зусиль  $H_{exp}$ . Внаслідок повторних навантажень розвиток пластичних деформацій та тріщиноутворення в бетоні розпір в зтяжці зменшився. При  $F_{сус} = 30,0; 60,0$  кН середні експериментальні значення зусилля в зтяжках дорівнювали  $H_{exp} = 54,5$  і  $96,0$  кН, а коефіцієнт податливості – відповідно  $k_{exp} = 1,017$  і  $0,968$ , а середнє значення  $k_{exp,m} = 0,993$ . При перевищенні цього рівня при навантаженні до

руйнування зусилля в затяжках почало зменшуватися до теоретичного значення.

Після дії повторних навантажень розпір в затяжці зменшується, а експериментальне значення коефіцієнта податливості збільшується на 7 % і наближається до  $k_r = 1,0$ , за рахунок цього згинальний момент  $M$  збільшується, а значення поздовжньої сили  $N$  зменшується.

Аналізуючи розвиток деформацій у бетоні і арматурі, можна відмітити вплив на них повторних навантажень. В арці 1А-1 при навантаженні до руйнування, деформації в розтягнутій арматурі змінювалися майже пропорційно зростанню сили та досягли значення  $\varepsilon_{s1} = 225,8 \times 10^{-5}$  (максимальні деформації арматури, які відповідають межі текучості, становлять  $\varepsilon_{s0} = 314 \times 10^{-5}$ ). У стиснутій зоні деформації в бетоні та арматурі збільшувалися пропорційно навантаженню до  $F = 70$  кН, після чого інтенсивність зростання деформацій в арматурі збільшилася, а в бетоні їхня інтенсивність суттєво зменшилася.

Повторні навантаження змінили характер зміни деформацій в бетоні і арматурі при навантаженні на одинадцятому циклі. Залишкові деформації в розтягнутій арматурі та стиснутому бетоні складають до 38 % від максимальних деформацій на десятому циклі навантаження. При збільшенні навантаження у верхньому поясі арок почали виникати додаткові пластичні деформації бетону і нові тріщини, що спричинило повернення кривини до осі навантажень.

Характер деформування арки 2А-1 аналогічний арці 1А-1 деформації змінювався майже пропорційно зростанню сили. Внаслідок попереднього напруження затяжки в арці 2А-2 виник вигин протилежний до напрямку навантаження, а деформації бетону та арматури набули від'ємних значень.

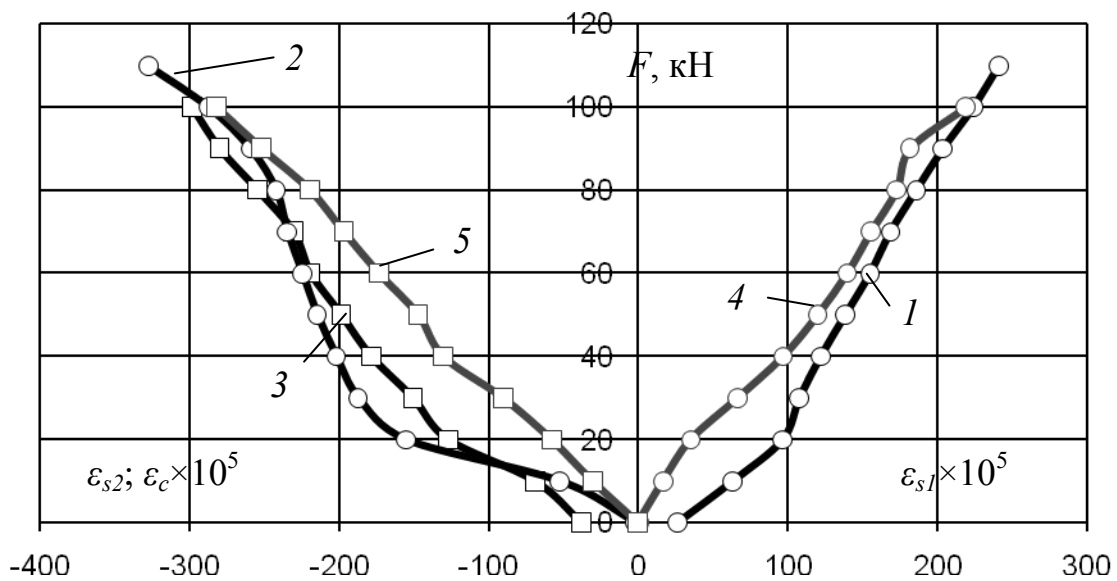


Рис. 6. Зміна деформацій бетону і арматури в арках другої серії в 2А-3:  
 1 – деформацій в розтягнутій арматурі; 2 – стиснутій арматурі; 3 – стиснутій зоні бетону, та в арці 2А-1: 4 – деформацій в розтягнутій арматурі; 5 – стиснутій зоні бетону

На першому ступені навантаження відбулося стрімке збільшення деформацій в бетоні та стиснутій арматурі, це компенсувало розтягувальні деформації від попереднього натягу затяжки. В подальшому приріст деформацій стабілізувався. При руйнуванні деформації розтягнутої арматури зменшились на 11 %, а деформації в бетоні відповідно збільшились, що призвело до крихкого руйнування арки.

Характер деформування арок 2А-3 та 2А-4 на першому циклі аналогічний зміні деформацій в арці 2А-2; на другому циклі відбувся різкий приріст деформацій. Потім до сьомого циклу деформації збільшувались поступово та перевищили значення відповідних деформацій в арці 2А-1 на рівні  $F = 60$  кН. При збільшенні навантаження до  $F = 100$  кН деформації бетону та арматури прямують до значень, визначених в арці 2А-1, яка випробовувалась без попереднього натягу (рис. 6).



При вивченні прогинів криволінійного бруса необхідно враховувати податливість зтяжки та вигин внаслідок її напруження. В арках 2А-2, 2А-3, 2А-4 при напруженні зтяжки до  $\Delta H = 8$  кН вигин склав  $f = 3,89; 4,01; 4,1$  мм. Внаслідок повторних навантажень залишкові прогини в арках 2А-3 і 2А-4 склали 2,91 мм і 2,22 мм (в середньому 2,56 мм), що становить 20 % від середнього прогину на першому циклі навантаження. При монотонному навантаженні арки 2А-2 прогин на останньому ступені навантаження склав  $f = 5,85$  мм, що на 35 % менше ніж в арці 2А-1. На одинадцятому циклі навантаження після дії повторних навантажень, при  $F = 60,0$  кН прогини в арках 2А-3, 2А-4 склали відповідно  $f = 7,45; 7,23$  мм, що на 14,7 % менше ніж в арці 2А-1 на рівні прикладання повторних навантажень  $f = 8,61$  мм. При  $F = 80,0$  кН прогин в арці 2А-1 склав  $f = 10,66$  мм, а сумарні прогини верхнього поясу арок 2А-3, 2А-4 склали відповідно  $f = 12,18; 11,86$  мм без врахування початкового вигину (рис.7).

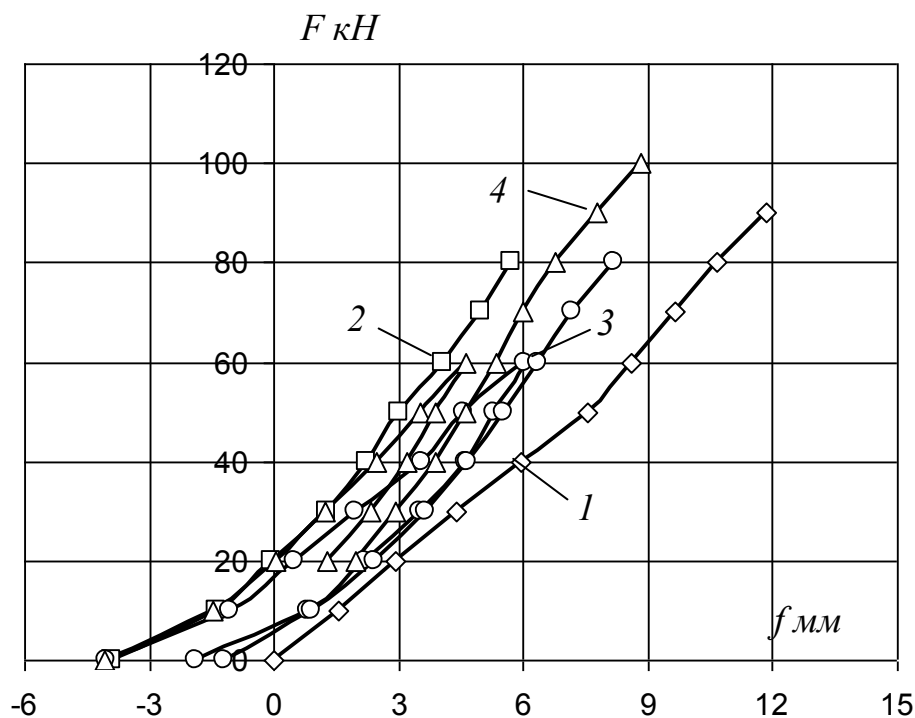


Рис.7. Залежність прогинів верхнього поясу арок від навантаження: 1 – арка 2А-1; 2 – арка 2А-2; 3 – арка 2А-3(1 - й, 11 - й цикли); 4 – арка 2А-4(1 - й, 11 - й цикл)

Прогини в арках при повторних навантаженнях, які піддавались напруженню зтяжки на першому ступені навантаження, переважають над прогинам в арці без попереднього натягу. За рахунок початкового вигину елемента кінцевий прогин зменшується на 35 % при монотонному навантаженні та на 14,7 % – при повторних навантаженнях, на рівні 60 % від руйнівного значення, а сумарний прогин близький один до одного.

**Висновок.** Попереднє напруження зтяжки впливає на напружено-деформований стан в нормальному перерізі арки, зменшується максимальний згинальний момент до 30% в перерізах арки, що сприяє зменшенню прогину та збільшенню тріщиностійкості арки. Встановлено, що попередній натяг зтяжки, який визначений з умов граничної рівноваги, зменшує кінцевий прогин арки на 35 % при монотонному навантаженні та до 15 % – при повторних навантаженнях, на рівні 60 % від руйнівного значення.

## Література

1. Барашиков А.Я. Расчет железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок / Барашиков А.Я. / Киев: Будівельник, 1977.- 156 с.
2. Бабич Є.М. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень / Бабич Є.М., Крусь Ю.О. /: Монографія. - Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 1999.- 119 с.
3. Бабич Є.М. Вплив повторних навантажень на роботу замкнених залізобетонних рам / Бабич Є.М., Філіпчук С.В. / Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: Збірник наукових праць. – Львів: Каменярь, 2007. – Випуск 7. – С. 167 – 172.
4. Кислюк Д.Я. Вплив попереднього напруження зтяжки на перерозподіл зусиль в двохшарнірних залізобетонних арках при повторних навантаженнях / Кислюк Д.Я. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Луцьк: РВВ ЛНТУ. – 2014. Вип. 44. – с. 131-136
5. Кислюк Д.Я. „Дослідження прогинів двохшарнірних залізобетонних арок з регулюванням зусиль в зтяжці при дії повторних навантажень” // Кислюк Д.Я. / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди Збірник наукових праць Випуск 18 - Рівне : НУВГП, 2009р. – С. 215 – 220.
6. Кислюк Д.Я. „Дослідження роботи двохшарнірних залізобетонних арок при повторному навантаженні з попереднім напруженням зтяжки” / Кислюк Д.Я. / Містобудування та територіальне планування: Науково-технічний збірник Випуск №33 – Київ: КНУБА, 2009. – С. 186-194.