

УДК 624.046.5

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ ВУЗЛІВ ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРНО-ВАНТОВОЇ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ ШЛЯХОМ

Д-р техн. наук Л. І. Стороженко, канд. техн. наук Г. М. Гасій

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УЗЛОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРНО-ВАНТОВОЙ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ПУТЕМ

Д-р техн. наук Л. И. Стороженко, канд. техн. наук Г. М. Гасий

DETERMINATION DISPLACEMENT OF NODES OF THE STEEL AND CONCRETE COMPOSITE CABLE SPACE FRAMES BY EXPERIMENTATION

Dr. of techn. sciences L. I. Storozhenko, Cand. of techn. sciences G. M. Gasii

У статті наведено результати експериментального дослідження просторової структурно-вантової сталезалізобетонної аркової конструкції прогоном 5,3 м, яка збиралася з гнучкого нижнього пояса, виготовленого з відрізків сталевого прокату круглого перерізу, і просторових сталезалізобетонних модулів, які склалися з залізобетонної плити і сталевий просторової решітки. Наведено особливості методики досліджень і засоби вимірювання переміщень. Встановлено, що досліджувана конструкція впродовж усього випробовування продемонструвала сумісну роботу всіх її складових.

Ключові слова: сталезалізобетон, структура, ванта, переміщення, напруження, деформація, модуль.

В статье приведены результаты экспериментального исследования пространственной структурно-вантовой сталежелезобетонной арочной конструкции пролетом 5,3 м, которая была собрана с гибкого нижнего пояса, изготовленного из отрезков стального проката круглого сечения, и пространственных сталежелезобетонных модулей, которые состояли из железобетонной плиты и стальной пространственной решетки. Приведены особенности методики исследований и средства измерения перемещений. Установлено, что исследуемая конструкция в течение всего испытания продемонстрировала совместную работу всех ее составляющих.

Ключевые слова: сталежелезобетон, структура, ванта, напряжение, деформация, перемещение, модуль.

The article presents methodology specifics of experimental studies of the effectiveness of constructive solutions for new space systems. Research methodology developed by the example of full-scale prototype of the steel and concrete composite cable space frame in span 5.3 m, which includes the space steel and concrete composite modules and a flexible bottom chord. The methodology provides to study movement of the prototype by testing in the uniform load applied in nodes. It also provides the definition of displacement of nodes of the prototype. According to the developed technique, stressed state of the full-scale prototype of the steel and concrete composite cable space frame was studied with a mechanic method. Schemes of arrangement of equipment and devices for measuring displacements of the full-scale prototype of the steel and concrete composite cable space frames are presented. Drawings of full-scale prototype of the steel and concrete

composite cable space frame are presented. The specifics of research method and measurement tools are described.

Keywords: *composite steel and concrete, space structure, cable, stress, strain, module.*

Вступ. Просторова структурно-вантова сталезалізобетонна конструкція є новим збірним композитним покриттям, яке збирається зі сталезалізобетонних модулів і гнучкого нижнього пояса. Сутність конструкції полягає в особливостях її будови, конструктивному вирішенні та способі з'єднання її складових. Запропоноване рішення дозволяє ефективно та раціонально використовувати будівельні матеріали.

Огляд останніх джерел і публікацій показав, що з-поміж нині існуючих композитних рішень просторових конструкцій найчастіше виділяють сталезалізобетонні конструкції, особливість яких полягає в поєднанні залізобетонних плит зі сталевими стрижневими елементами. У роботі [1] досліджено міцність і деформативність сталезалізобетонної шпренгельної конструкції. Верхній пояс такої конструкції виготовляється зі сталевих балок, що об'єднані з монолітною залізобетонною плитою за допомогою анкерів.

У роботі [2] пропонується удосконалене рішення прогонової конструкції, яка складається з металевих модульних елементів, залізобетонної плити, верхнього і нижнього поясів. Конструкція відрізняється від попереднього рішення способом забезпечення сумісної роботи залізобетонної плити зі сталевією складовою.

Існує досвід будівництва композитних просторових конструкцій покриття споруд транспортних галерей із сталезалізобетонних ферм, несуча здатність яких збільшена на 20 % за рахунок додаткового стиску плити [3]. Несучу здатність просторових сталезалізобетонних конструкцій також можна підвищувати за рахунок попереднього напруження елементів [4].

Серед просторових конструкцій відомі структурні сталеві покриття з залізо-

бетонними плитами, які виконують роль верхнього пояса. До переваг таких конструкцій відносять низькі витрати сталі [5].

Зважаючи на викладене, ідея об'єднати новим способом в одну цілісну конструкцію традиційні елементи – плити і стрижні – є оригінальною. Таке рішення дозволить вирізняти запропоновані конструкції з-поміж існуючих у новий тип покриття. Розроблена конструкція покриття позбавлена недоліків, властивих аналогам. Концепція запропонованого рішення полягає в синтезі досвіду і нових досягнень, використанні модульних елементів, трудомісткість та складність технології виготовлення, збирання та монтаж яких є меншими, ніж в аналогів [6].

Ефективність рішення просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції та її складових елементів – модулів – досліджена та обґрунтована [7-12].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. З аналізу попередніх праць видно, що недослідженим залишається питання вивчення особливостей роботи запропонованих конструкцій на великомасштабних зразках.

Постановка завдання. Експериментальним шляхом встановити вузлові переміщення запропонованої просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції під навантаженням.

Основним завданням експериментального дослідження просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції є отримати дані, які підтверджуватимуть достовірність результатів попередніх експериментальних і теоретичних досліджень, а також дозволять обґрунтувати ефективність рішення запропонованої конструкції, вузлів і способу забезпечення сумісної роботи сталевих і бетонних елементів.

Основний матеріал і результати.

Дослідний зразок просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції прогоном 5,3 м (рис. 1) складався з семи просторових сталезалізобетонних модулів (рис. 2, 3), які були з'єднані між собою за допомогою болтів і гнучкими стрижневими елементами (рис. 4). Гнучкі стрижневі елементи, з'єднуючи просторові модулі, утворювали нижній пояс.

Просторовий сталезалізобетонний модуль складався з двох частин: залізобетонної плити і сталеві просторової решітки, а гнучкий стрижневий елемент – лише зі сталі.

Сталеві частини та деталі дослідної конструкції виготовлялися на заводі металоконструкцій у м. Полтава, а бетонування – у лабораторії з виготовлення будівельних конструкцій в умовах, близьких до реального будівництва.

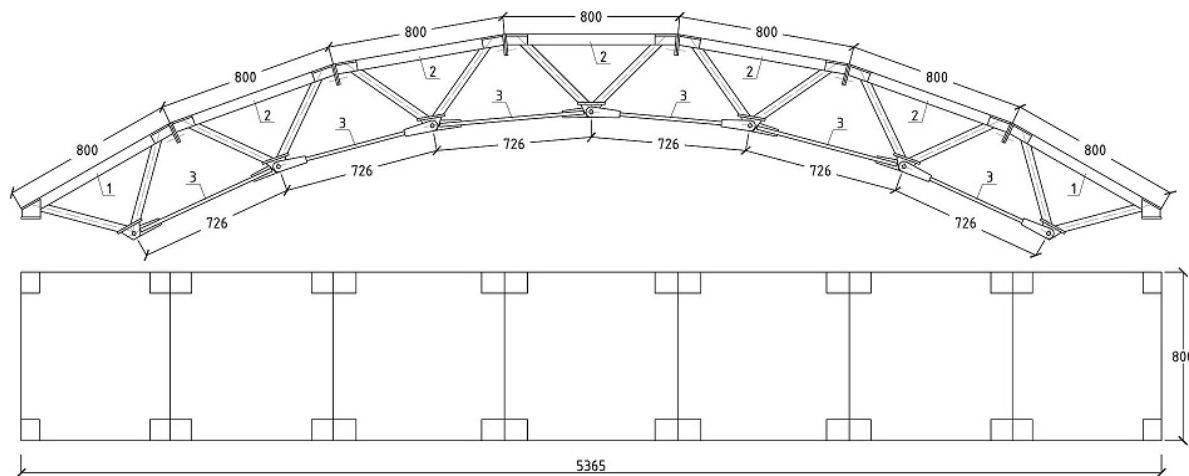


Рис. 1. Просторова структурно-вантова сталезалізобетонна аркова конструкція покриття:
1 – крайній модуль; 2 – типовий модуль; 3 – гнучкий стрижневий елемент нижнього пояса

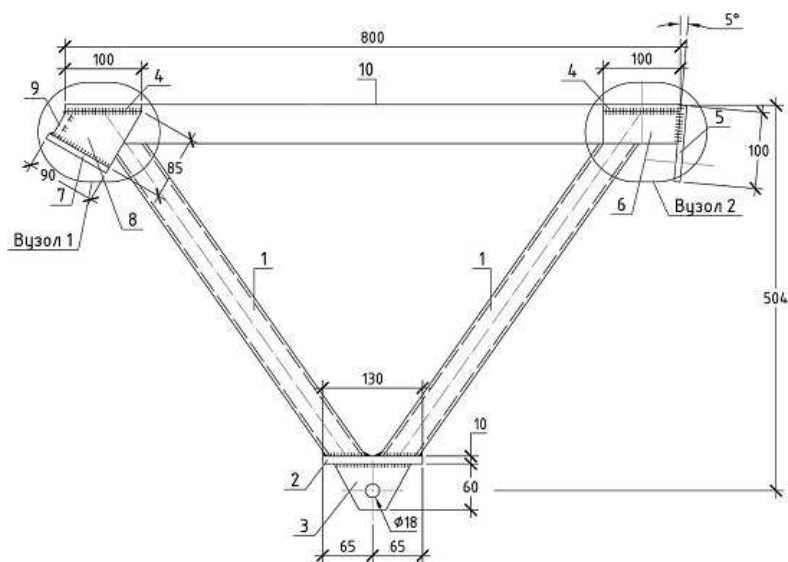


Рис. 2. Крайній просторовий сталезалізобетонний модуль:
1 – сталеві труба Ø42; 2, 3 – пластини товщиною 10 мм; 4, 5, 6, 7, 8, 9 – пластини товщиною 9 мм; 10 – залізобетонна плита товщиною 50 мм

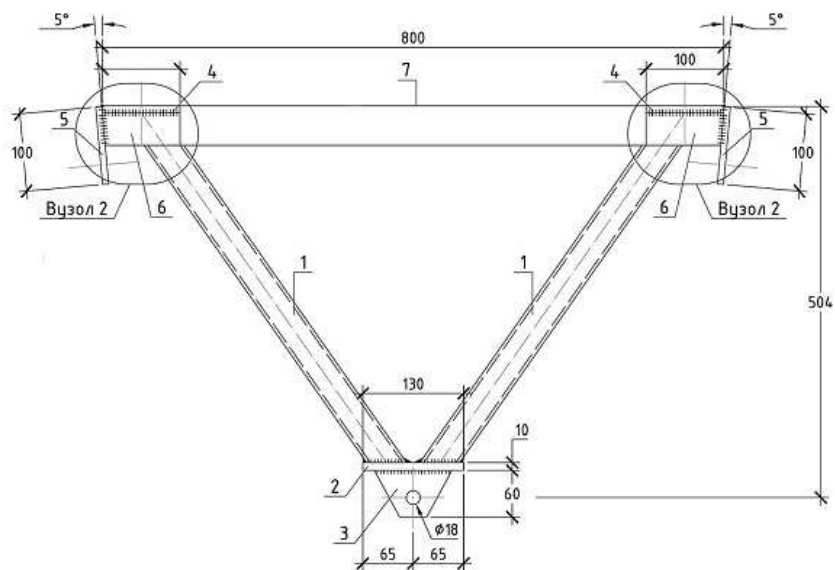


Рис. 3. Типовий просторовий сталезалізобетонний модуль:
 1 – сталеві труби $\text{Ø}42$; 2, 3 – пластини товщиною 10 мм;
 4, 5, 6 – пластини товщиною 9 мм; 7 – залізобетонна плита товщиною 50 мм

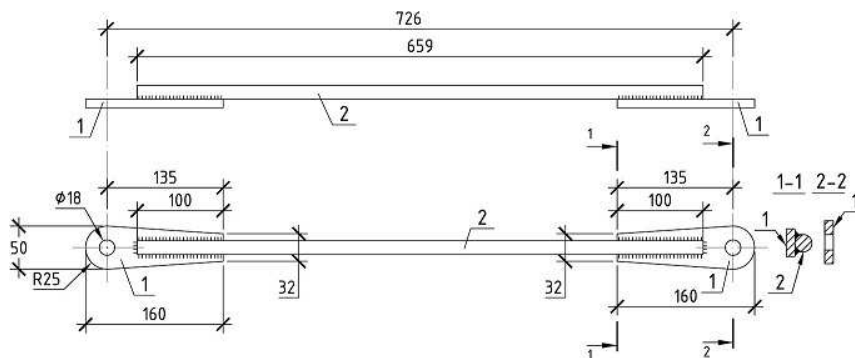


Рис. 4. Гнучкий стрижневий модуль:
 1 – деталь з листової сталі; 2 – прокат сталевий гарячекатаний круглий

Просторові сталезалізобетонні модулі мали розміри на плані $0,8 \times 0,8$ м та висоту 0,5 м. Залізобетонна плита модуля мала товщину 50 мм та виготовлялася з бетонної суміші на цементі марки М400 та армувалася сіткою.

З'єднання сталевих деталей і елементів між собою виконувалося за допомогою ручного дугового зварювання в заводських умовах з дотриманням усіх правил контролю якості зварного з'єднання. Виконання зварювальних робіт

сталевих деталей і всіх операцій, пов'язаних з цим, здійснювалося відповідно до чинних вимог.

Після виконання усіх зварювальних робіт, перевірки якості зварного з'єднання та відповідності фактичних геометричних розмірів проектним було виконано бетонування верхнього пояса. Бетонування модулів здійснювалося в перевернутому положенні з улаштуванням опалубки лише по контуру плити (рис. 5).



Рис. 5. Бетонування верхнього пояса просторового сталезалізобетонного модуля

Бетонна суміш готувалася в бетонозмішувачі примусової дії. Ущільнення бетонної суміші в опалубці здійснювалося шляхом ручного штикування. Тужавіння бетонної суміші відбувалося в лабораторних умовах у неопалюваному павільйоні в осінній період при сприятливих умовах і задовільних показниках мікроклімату приміщення.

Після набирання бетоном проектної міцності була знята опалубка, а зразки транспортувалися в лабораторію для збирання експериментальної конструкції. Слід також зазначити, що при виготовленні, бетонуванні і транспортуванні

конструкції застосовувалися лише типові операції, виконання яких не потребувало використання спеціальних чи унікальних пристосувань, засобів або приладів.

Перед збиранням конструкції просторові сталезалізобетонні модулі були розкладені в ряд на рівній поверхні, це було зроблено для того, щоб полегшити процедуру збирання.

Збирання дослідної конструкції здійснювалося на рівні підлози. Для цього просторові сталезалізобетонні модулі поверталися й укладалися на дерев'яні підкладки бічною поверхнею плити, тобто на ребро (рис. 6).



Рис. 6. Збирання просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції

При збиранні дослідної конструкції болти відразу не затягувалися до проектного натягу (рис. 7), це робилося після того, як конструкція була зібрана повністю, тільки після цього болти затягувалися повністю. Це дало змогу шляхом

почергового затягування болтів нівелювати неточності виготовлення модулів.

Потім дослідна конструкція з положення на ребрі монтувалася на нерухомі опори та закріплювалася. Монтування конструкції здійснювалося за допомогою кран-балки вантажопідйомністю 1 т (рис. 8).



Рис. 7. Вузлове з'єднання просторових модулів у площині верхнього (а) і нижнього пояса (б) на стадії збирання дослідного зразка



Рис. 8. Просторова структурно-вантова сталезалізобетонна конструкція в процесі монтажу

Конструкція устанавлювалася на опори як вільно обперта з накладанням на опорні вузли в'язей, які перешкоджали вертикальним переміщенням опорних вузлів з обох боків і горизонтальним переміщенням з одного боку. Після

установлення дослідного зразка на опори було отримано просторову структурно-вантову сталезалізобетонну конструкцію прогоном 5,3 м, яка була готова до випробувань (рис. 9).



Рис. 9. Просторова структурно-вантова сталезалізобетонна конструкція в змонтованому стані

Методика експериментального дослідження передбачала випробування дослідної конструкції на дію тимчасового навантаження.

Зважаючи на те, що габарити дослідної конструкції були значні, то застосування стандартного лабораторного обладнання, зокрема пресів для створення та прикладення тимчасового вузлового навантаження на конструкцію, було неможливим. Тому завантаження дослідного зразка було здійснено за допомогою металевих вантажів, що мали

форму дисків. Для прикладення до дослідної конструкції ваги у формі металевих дисків було застосовано шість траверс, кожна з яких складалася з перекладины і двох штанг. З одного боку штанги був зроблений шарнір, який дозволяв штанзі обертатися, а з іншого боку був зроблений упор у вигляді диска, на який укладалися вантажі.

Такі траверси укладалися перекладиною на верхній пояс конструкції в місцях з'єднання просторових сталезалізобетонних модулів (рис. 10).



Рис. 10. Розміщення траверс, через які прикладалося навантаження

Для фіксування та запобігання зсуву або переміщення траверси під час завантаження конструкції в місцях їх укладання було улаштовано упори. Завдяки такому рішенню випробування запропоно-

ваної конструкції на дію тимчасового навантаження за схемою відповідно до методики експериментального дослідження стало можливим.

Дослідження експериментального зразка на дію навантаження здійснювалося ступінчасто в декілька стадій.

Для вимірювання переміщень вузлів були використані механічні прогиноміри Аістова типу БПАО (рис. 11).

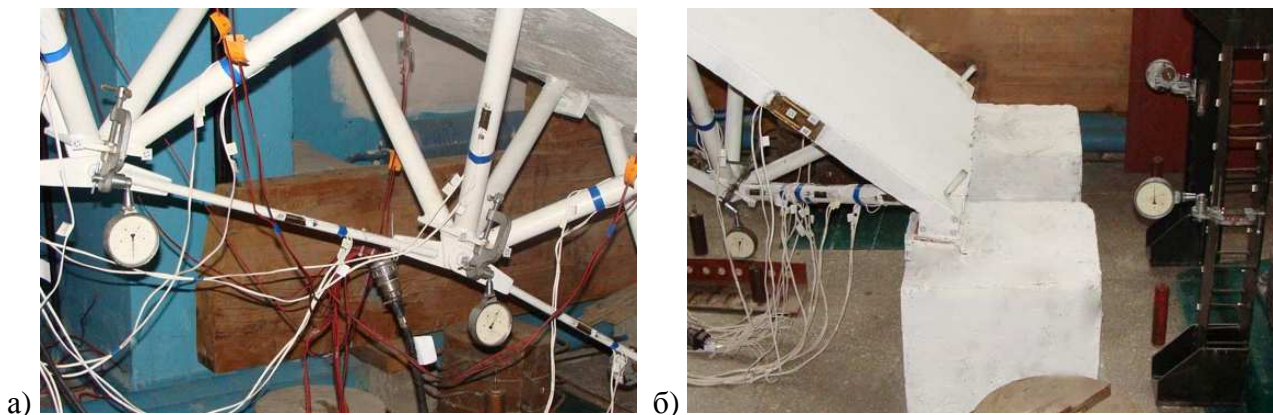


Рис. 11. Розміщення обладнання для вимірювання переміщень у вузлах нижнього пояса (а) та опорних вузлах (б)

Також за допомогою прогиномірів було заміряно взаємне зміщення крайніх вузлів нижнього пояса. Для цього в одному з крайніх вузлів на шапці болта було улаштовано шарнірне кріплення сталевого дроту, а в іншому вузлі було прикріплено

обвідний блок, через який цей дріт обертався і приєднувався до прогиноміра.

Після налагодження обладнання та пристосувань було проведено випробування експериментального зразка розробленої конструкції на дію тимчасового навантаження (рис. 12).



Рис. 12. Дослідний зразок просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції на стадії випробування

Зняття показів із вимірювального обладнання здійснювалося на кожному етапі після 30-хвилинної витримки.

Спостерігаючи за конструкцією під час проведення експерименту, було встановлено, що її поведінка та схема

деформування відповідає теоретичним даним. Також слід зазначити, що під час огляду конструкції на кожній стадії завантаження та в кінці експерименту будь-яких пошкоджень вузлів або елементів конструкції не виявлено, зокрема не виявлено тріщин. Необхідно зауважити, що, за методикою експериментальних досліджень конструкція досліджувалася на дію експлуатаційного навантаження (70 % несучої здатності), тобто руйнування конструкції не ставилося за мету.

У результаті оброблення експериментальних даних було отримано залежності прогинів конструкції у вузлах від рівня завантаження. Залежність прогинів від величини навантаження відображено у вигляді графіка (рис. 13).

Деформації експериментальної конструкції були пружними. Збірна просторова структурно-вантова сталезалізобетонна

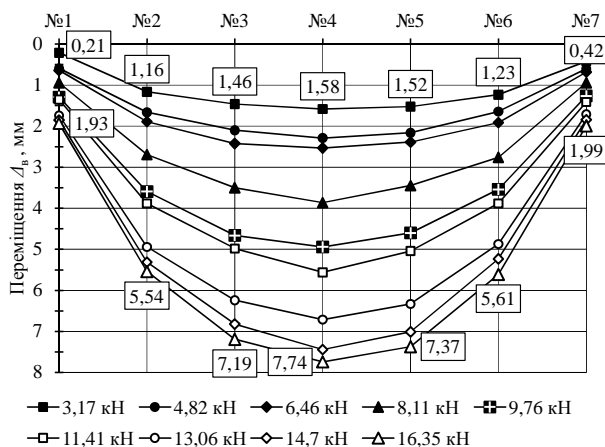


Рис. 13. Вертикальні переміщення вузлів нижнього пояса

На рис. 15 наведено залежність розвитку переміщень від рівня завантаження в опорних вузлах конструкції.

Із залежності горизонтальних переміщень опорних вузлів від рівня завантаження видно, що вони зміщувалися рівномірно та поступово. Очевидним також є те, що експериментальний зразок зірної

конструкція, складена з модульних елементів, працювала як єдина система, а розроблені вузли з'єднання забезпечили сумісну роботу модульних елементів. Прогини в досліджуваних вузлах мали лінійну залежність протягом усього експерименту, що є звичайним при роботі конструкції у пружній стадії. Прогини вздовж конструкції зростали плавно від її крайніх до центральних вузлів. Максимальні вертикальні переміщення виникли посередині конструкції у вузлі №4. Вертикальні переміщення дзеркально розміщених вузлів нижнього пояса відносно поперечної осі симетрії конструкції були приблизно однаковими. Максимальна розбіжність вертикальних переміщень у дзеркально розташованих вузлах дорівнювала 3,1 %, а середня розбіжність не перевищила 2,3 % (рис. 14).

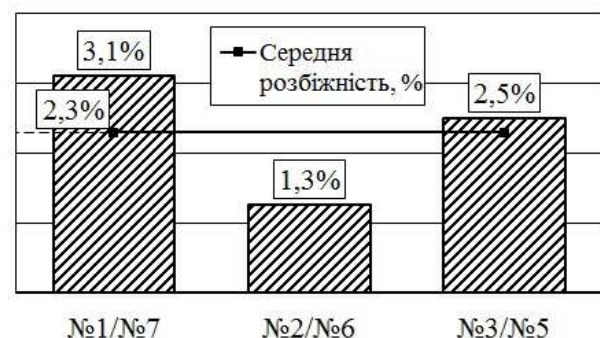


Рис. 14. Розбіжність показів між дзеркально розташованими прогиномірами

просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції під час випробування працював як цілісна система, оскільки величина горизонтальних переміщень опорних вузлів практично однакова, розбіжність між значеннями не перевищила 6,3 %.

На рис. 16 наведено залежність взаємного зміщення крайніх вузлів нижнього пояса від рівня завантаження.

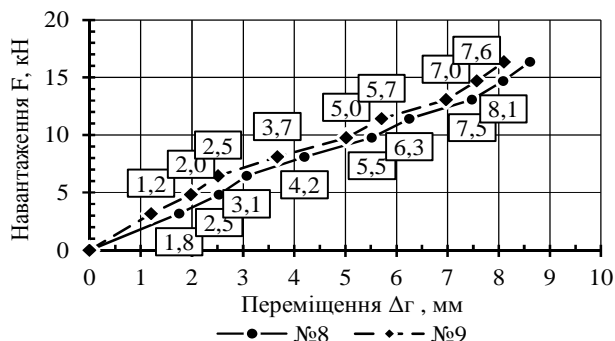


Рис. 15. Горизонтальні переміщення опорних вузлів

Висновки. У підсумку експериментального дослідження просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції на дію тимчасового навантаження було отримано дані, на підставі аналізу яких зроблено такі висновки:

1. Програма експериментального дослідження була розроблена таким чином, щоб отримати дані, які чітко охарактеризують поведінку конструкції.
2. Фізико-механічні властивості сталі та бетону, які були використані для виготовлення дослідної конструкції, були стандартними й аналогічними тим матеріалам, що звичайно використовуються для виготовлення будівельних сталевих і залізобетонних конструкцій.
3. Технологія виготовлення дослідного зразка значною мірою є аналогічною існуючим, однак методика збирання та

Наведений графік демонструє лінійну залежність, що також є підтвердженням сумісної роботи елементів запропонованої конструкції.

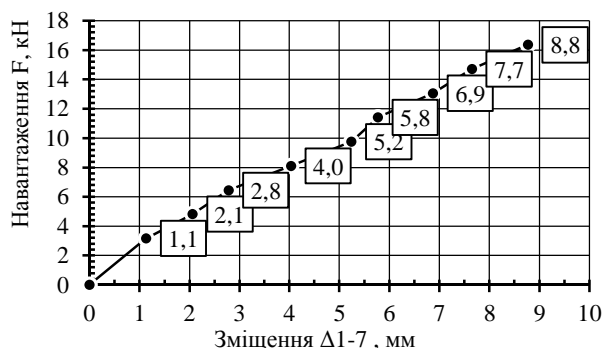


Рис. 16. Взаємне зміщення крайніх вузлів нижнього пояса

монтажу є оригінальною у своєму виконанні.

4. Застосовані в експериментальному дослідженні вимірювальні прилади та пристосування дозволили отримати дані, що об'єктивно описують особливості роботи конструкції під дією навантаження.
5. Досліджувана конструкція впродовж усього випробовування продемонструвала сумісну роботу всіх її складових.
6. Прогини дослідної конструкції складають 1/690.
7. Дані, отримані експериментальним шляхом, свідчать про просторову роботу і ефективність рішення запропонованої конструкції, яка з успіхом може застосовуватися в різноманітних галузях будівництва при зведенні покриття будівель і споруд.

Список використаних джерел

1. Вибранець, Ю. Ю. Міцність і деформативність комбінованих металевих систем, об'єднаних у сумісну роботу зі залізобетонною плитою [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Ю. Ю. Вибранець. – Львів, 2016. – 158 с.
2. Краснов, С. М. Удосконалення систем прогонних будов пішохідних мостів при динамічному впливі [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / С. М. Краснов. – Харків, 2015. – 268 с.

3. Шпалянская, Т. И. Экспериментальные исследования пространственных пролетных строений транспортных галерей [Текст] / Т.И. Шпалянская, В.Я. Якунин // Пространственные конструкции в Красноярском крае. – Красноярск: КПИ, 1983. – С. 94–97.
4. Patent US6915615B2 United States. IPC E04C3/30. Prestressed composite truss girder and construction method of the same / D.Y. Won; Original Assignee D.Y. Won. US 10/297.779; Filing Date 28.02.2002; Publication Date 12.06.2005. – 35 p.
5. Абовская, С. Н. Пространственные сталежелезобетонные панели покрытия [Текст] / С.Н. Абовская, Н.Б. Егикян. – Красноярск: КрасАСА, 1998. – 147 с.
6. Gsii G.M. Comparative characteristics of the spatial grid-cable steel-concrete composite slab / G.M. Gsii / Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2016. – № 844. – С. 260–265.
7. Gsii G.M. Types of steel and concrete composite cable space frames / G.M. Gsii / Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2016. – №6 (66). – P. 158 – 165. DOI: 10.15802/stp2016/90514.
8. Storozhenko L.I. Analysis of stress-strain state of the steel-concrete composite ribbed slab as a part of the spatial grid-cable suspended structure / L.I. Storozhenko, G.M. Gsii // Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Poltava: PoltNTU, 2016. – №2. – P. 81-86.
9. Gsii G.M. The flat double-layer grid-cable steel-concrete composite / G.M. Gsii // Proceedings of the METNET Seminar 2016 in Castellon. – Hämeenlinna: HAMK University of Applied Sciences, 2016. – P. 56–62.
10. Стороженко, Л. І. Великопролітні структурно-вантові сталеалюмінієві покриття для будівель і споруд аеропортів [Текст] / Л.І. Стороженко, Г.М. Гасій // Проблеми розвитку міського середовища. – К.: НАУ, 2016. – №2. – С. 72–79.
11. Гасій, Г. М. Основи формотворення і проектування просторових покриттів із структурно-вантових сталеалюмінієвих конструкцій [Текст] / Г.М. Гасій // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2016. – №87. – С. 48–53.
12. Стороженко, Л. І. Особливості конструктивного рішення та проектування повнорозмірного експериментального зразка структурно-вантового сталеалюмінієвого покриття [Текст] / Л.І. Стороженко, Г.М. Гасій // Зб. наук. праць. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво [Полтавський нац/ техн/ ун-т ім. Ю. Кондратюка]. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – №1. – С. 52–60.

Стороженко Леонід Іванович, д-р техн. наук, професор, професор кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Гасій Григорій Михайлович, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

E-mail: grigorii_g_m@ukr.net.

Storozhenko Leonid Ivanovych, doct. of techn. sciences, professor, professor of the department of structures from a metal, wood and plastics, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

Gsii Grygorii Mykhailovych, cand. of techn. sciences, associate professor, doctoral student of the department of structures from a metal, wood and plastics, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

E-mail: grigorii_g_m@ukr.net.

Стаття прийнята 13.04.2017 р.