

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІГОНАЛЬНОЇ АРКОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНОЙ АРОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF POLYGONAL ARC CONSTRUCTION

Стоянов В.В. д.т.н., проф., **Коршак О.М.** к.т.н., доц., **Бояджі А. А.** к.т.н., ст. викл., **Бойко О.В.** асп., ас., **Рольський С.Е.** магістр,
(Одеська державна академія будівництва та архітектури)

Стоянов В.В. д.т.н., проф., **Коршак О.М.** к.т.н., доц., **Бояджи А. А.** к.т.н., ст. пр., **Бойко А.В.** асп., асс., **Рольский С.Э.** магистр
(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Stoyanov V.V. Dr.Sc. (Eng.), Prof., **Korshak O. M.** Cand. Sc. (Eng.), Assist. Prof., **Boyadzhi A. O.**, Cand. Sc. (Eng.), Assist. Prof., **Boyko A.V.** post graduate., **Rolsky S.E.** master's degree
(Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

Анотація. У статті досліджується напружено-деформований стан полігональної плоскої арочної конструкції з вузлами, що були розроблені авторами. Виконано аналітичний і чисельний розрахунок варіантів моделей, за результатами яких були обрані найбільш цікаві для експериментального дослідження. Експериментальне дослідження проводилося з визначенням поверхневих напружень електротензометричним методом і визначенням прогинів до повного руйнування конструкції під дією зосередженого навантаження в середині прольоту. Особливу увагу було приділено аналізу роботи раніше запропонованого авторами і використаного в досліджуваній конструкції варіанта вузла. Виконано аналіз результатів чисельних і експериментальних досліджень. Зроблено висновки.

Аннотация. В статье исследуется напряженно-деформированное состояние полигональной плоской арочной конструкции с разработанными авторами узлами. Выполнены аналитический и численный расчет вариантов моделей, по результатам которых были выбраны наиболее интересные для экспериментального исследования. Экспериментальное исследование проводилось с определением поверхностных напряжений электротензометрическим методом и определением прогибов до полного разрушения конструкции под действием сосредоточенной нагрузки в середине пролета. Особое внимание было уделено анализу работы раннее предложенного авторами и использованного в исследуемой конструкции варианта узла. Выполнен анализ результатов численных и экспериментальных исследований. Сделаны выводы.

Annotation. The article studies the stress-strain state of a polygonal flat arch structure with nodes using steel pipes. Analytical and numerical calculations of the model variants are performed, the results of which, the most interesting for the experimental study have been selected. In general, the results of the production of experimental polygonal structures with dimensions in the plan of 3.0 x 1.0 m indicate a high degree of their manufacturability, as well as the possibility of producing such structures at the operating plants of the glued wooden materials (GWM). But failure to meet the conditions for a gap between the wooden shelves of the connected I-bars can have a significant effect on the nature of the distribution and the magnitude of the stresses in the arch elements. This is due to the occurrence of plastic deformations in the most stressed areas, as well as the complex work of contact between a steel pipe and wooden elements.

The experimental study was carried out with the determination of surface stresses by the electrotensometric method and the determination of deflections until the structure was completely destroyed under the action of a concentrated load in the middle of the span. Particular attention was paid to the analysis of the earlier version of the knot proposed by the authors and used in the studied design. The analysis of the results of numerical and experimental studies is performed, according to the results of which it was found that the critical stresses determined in the program complex are less than determined experimentally (the maximum difference is 12%). Calculation of the design with the nodes with metal pipes makes the picture of the stresses in the structure more correct, but requires additional studies in the field of contacting the nodal elements to more accurately determine the deformations of the structure.

Ключові слова. Арочна конструкція, полігональне склепіння, клеєна дерев'яна балка, двотавр, несуча здатність.

Ключевые слова. Арочная конструкция, полигональный свод, клееная деревянная балка, двутавр, несущая способность.

Keywords. Arched construction, polygonal vault, glued wooden beam, I-beam, bearing capacity.

Введение. В настоящее время в Украине наблюдается устойчивое увеличение объемов производства двутавровых деревянных балок (ДДБ) со стенкой из OSB. Это значительно снизило импорт таких изделий и наполнило отечественный строительный рынок легкими и эффективными конструкциями собственного производства. Составные балки с элементами из листа OSB все чаще используются в каркасах малоэтажных зданий, а также в качестве элементов покрытий и перекрытий в каменных зданиях. Легкость, небольшая стоимость и возможность использования в полигональных конструкциях применяя предложенные ранее авторами узлы открывает новые сферы их применения в строительстве [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Проведенные ранее на кафедре МДиПК ОГАСА исследования прочности и деформативности двутавровых деревянных балок со стенкой из OSB [1], а также анализ различных конструктивных форм составных балок и особенностей их применения в каркасе зданий показали, что при выполнении определенных конструктивно-технологических требований к ДДБ [2, 3] (в совокупности с существующими методиками расчета таких балок) они могут быть использованы в полигональных сводчатых покрытиях пролетом 12-18 м.

Определение цели и задачи исследования. С целью изучения действительной работы предлагаемых конструкций [1], их элементов и соединений, выявления степени достоверности результатов численных исследований были проведены статические испытания полигональных арочных конструкций. Программа испытаний предусматривала кратковременные нагружения опытных образцов.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовать напряженно-деформированное состояние каждого конструктивного элемента конструкции;
- оценить степень и долю включения металлических уголков узлов в общую работу конструкции;
- определить действительную несущую способность и деформативность конструкции, выяснить место и характер разрушения;
- установить сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований для определения возможности применения программных комплексов и усовершенствованных методик расчета в инженерной практике;

Основная часть исследования. Для определения допускаемой нагрузки и предварительного выявления характера работы разработанной конструкции в экспериментальных условиях был проведен численный расчет модели в ПК ANSYS Workbench 19.0.

Наибольшие напряжения при сосредоточенной нагрузке в середине пролета в дереве и фанере возникают в центральном элементе (двутабре) при нагрузке $P = 8$ кН (рис. 1)

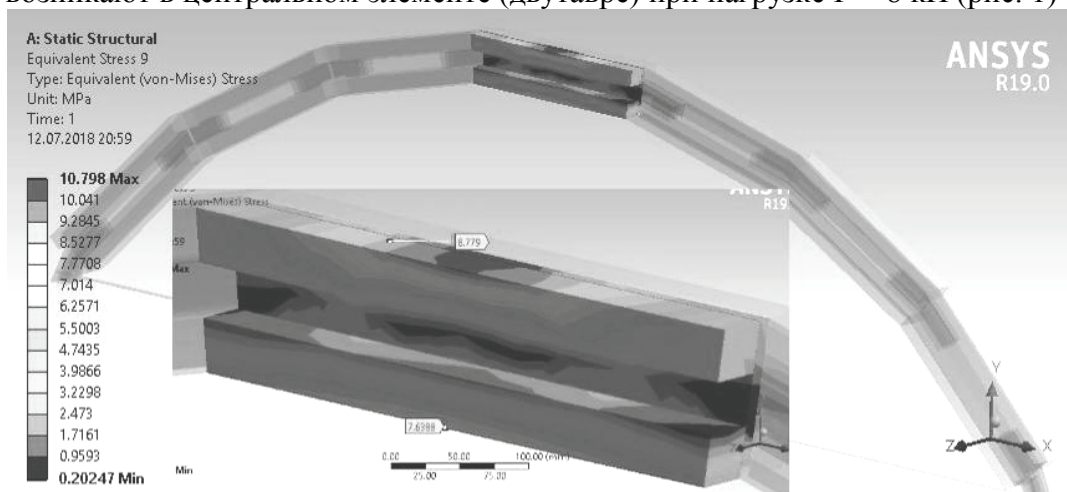


Рис. 1 Изополя эквивалентных напряжений по Мизесу в наиболее напряженном деревянном элементе 3м модели арочной полигональной конструкции

При этой же величине нагрузки наибольшие вертикальные перемещения (рис. 2) конструкции возникают в том же элементе и равняются $f = 7,7$ мм, что составляет $f = (1/390) / L$.

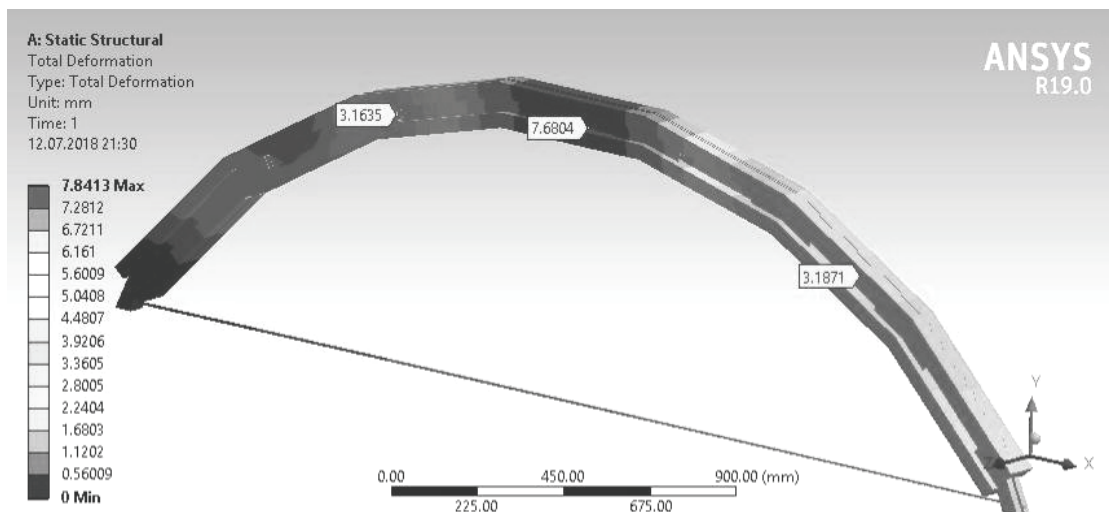


Рис. 2 Изополя вертикальных перемещений 3м модели арочной полигональной конструкции

Наибольшие напряжения в металле возникают в элементе, соединяющем центральный и соседний деревянные элементы (двутабры) и составляют $\sigma = 65$ МПа (рис. 3)

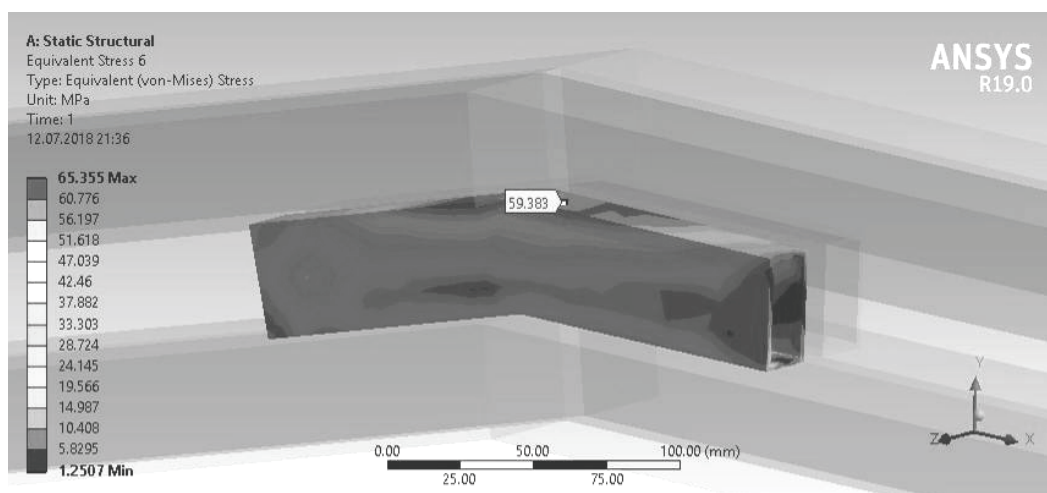


Рис. 3 Изополю эквивалентных напряжений по Мизесу в наиболее напряженном металлическом элементе 3м модели арочной полигональной конструкции

Согласно численному расчету в местах контактов элементов (дерево-дерево или металл-дерево) возникают наибольшие деформации и напряжения. В реальных условиях напряжения в конструкции будут распределяться иным образом, что связано с возникновением пластических деформаций на наиболее напряженных участках, а также сложной работой контакта стальной трубы и деревянных элементов.

Для испытаний были изготовлены две конструкции с применением ранее разработанных узлов [1]. Изготовление конструкций проводилось в соответствии с требованиями. В целом результаты изготовления опытных полигональных конструкций с размерами в плане 3,0 x 1,0 м свидетельствуют о высокой степени их технологичности, а также о возможности производства таких конструкций на действующих заводах КДК. Опытные конструкции после сборки и установки на опоры, показаны на рисунках 4 и 5.



Рис. 4 Экспериментальная модель арочной полигональной конструкции пролетом 3м

С учетом фактических размеров поперечных сечений элементов расчетная нагрузка на изготовленные конструкции, определенная по методике, изложенной в главе 3, составила $q = 8,1$ кН.

Арки нагружали в вертикальном положении сосредоточенной нагрузкой в середине пролета. Конструкции имели с одной стороны шарнирно-подвижную, с другой – шарнирно-неподвижную опоры.

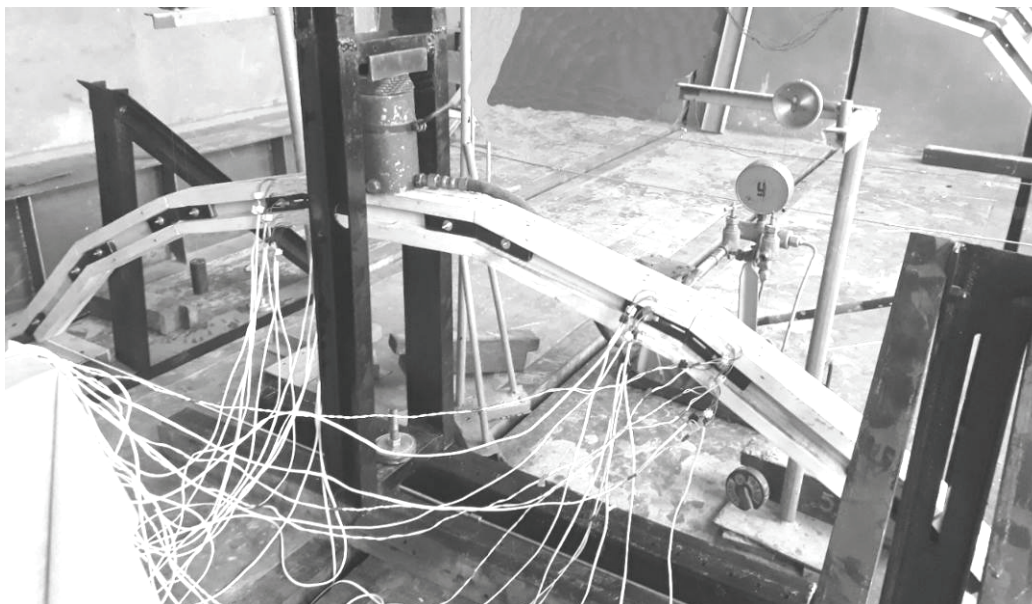


Рис. 5 Экспериментальная модель арочной полигональной конструкции пролетом 3м, установленная на опоры

Для получения четкой картины напряженно-деформированного состояния разработанных конструкций под нагрузкой при проведении испытаний измеряли основные деформации системы (прогибы арки в середине и третях пролета, изменение длины пролета) и деформации элементов. Для определения вышеуказанных деформаций приборы были установлены на элементы арочных конструкций согласно рисунку 6.

Основные деформации конструкции измеряли механическими приборами: прогибомерами Максимова и индикаторами часового типа ИЧ-10 с ценой деления шкалы 0,01 мм. Поверхностные деформации в элементах конструкции измеряли согласно общепринятой методике [4] с использованием тензорезисторов с базой 20 мм, расположенными на конструкции в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 6.

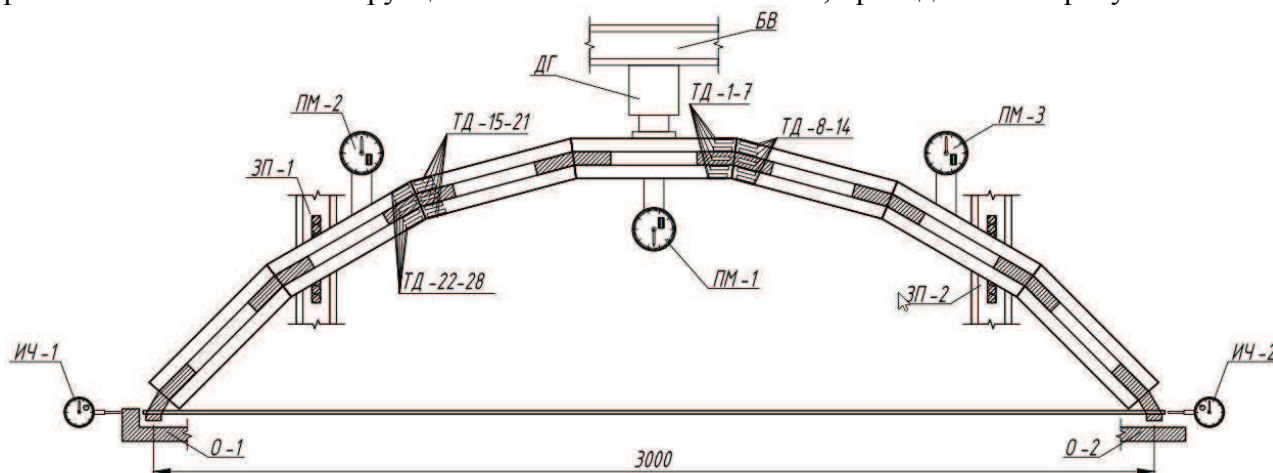


Рис. 6 Схема расположения приборов и оборудования на экспериментальной модели полигональной арочной конструкции: ТД – тензодатчики; ПМ – прогибомеры Максимова;

ИЧ – индикаторы часовые; О-1 – опора шарнирно неподвижная; О-2 – опора шарнирно подвижная; БВ – балка вспомогательная; ЗП – закрепления конструкции из плоскости; ДГ – домкрат гидравлический

Номинальное сопротивление тензорезисторов составляло $1 \approx 200$ Ом. Коэффициент тензочувствительности датчиков определялся при помощи тарировочной балки переменного поперечного сечения (постоянной жесткости).

В качестве регистрирующего устройства использовалась микропроцессорная многоканальная тензометрическая система Мост-02.

Нагрузка подавалась при помощи гидравлического домкрата и гидравлической станции высокого давления.

Всего на каждой из исследуемых арочных конструкций было установлено 28 тензорезисторов, 3 прогибомера и 2 индикатора.

Испытания полигональной плоской арочной конструкции с узлами с применением стальных труб пролетом 3,0 м и высотой подъема 0,85 м проведены в полном соответствии с вышеизложенной методикой.

Значения упругих характеристик древесины ребер и обшивки, устанавливали стандартными испытаниями на изгиб.

Значение фактического максимального прогиба конструкции в середине пролета от действия приведенной к сосредоточенной нормативной поперечной нагрузки (5,08 кН) составило в среднем 6,65 мм (рисунок 8), что соответствует величине относительного прогиба $1/451$ от расчетного пролета. При увеличении изгибной нагрузки на конструкцию до расчетного значения величина прогиба составила 11,9 мм или $1/252$. Значения прогибов при загрузке арки сосредоточенной нагрузкой отличались между собой не более чем на 3%.

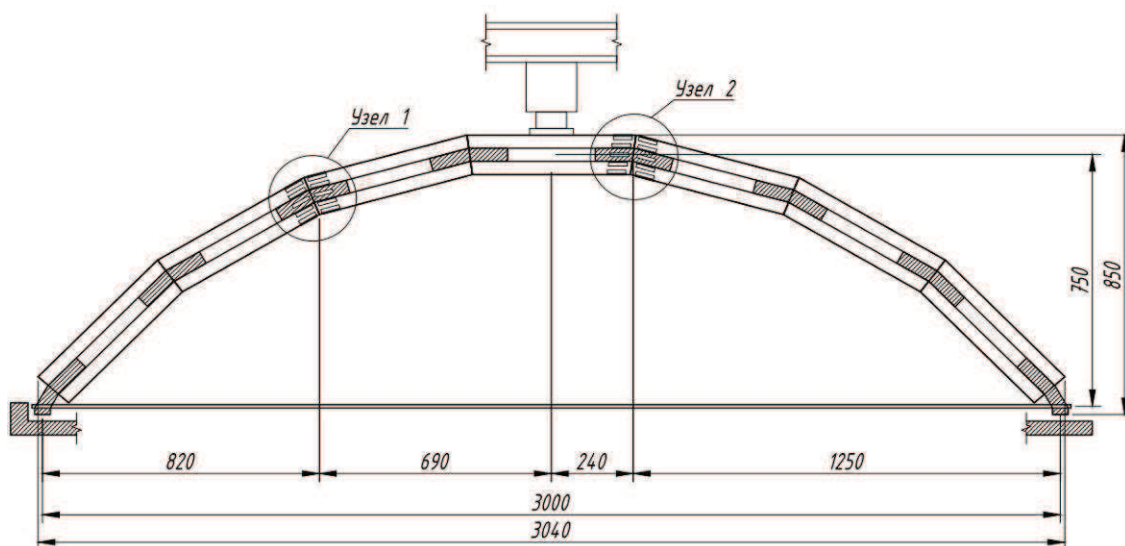


Рис. 7 Расположение исследуемых узлов на арочной полигональной конструкции

Анализ процессов деформирования элементов испытанных конструкций выявил, что в пределах расчетных значений нагрузок нарастание прогибов независимо от расположения элементов, происходило пропорционально нагрузке. Это свидетельствует об упругой работе арки и о том, что в процессе испытаний была обеспечена ее устойчивость.

Испытания опытных конструкций на различных стадиях показаны на рисунке 5, а их основные результаты приведены в рис. 9 - 12.

Напряженное состояние элементов арки оценивали по результатам тензометрирования. Зависимость сжато-изгибных напряжений от приложенной нагрузки в узле 1 (рис. 7) конструкции в исследуемом сечении представлены на рисунках 9 и 10. Работу элементов под нагрузкой изучали, наблюдая за изменениями в ней нормальных напряжений. Наиболее характерными являлись напряжения по нижним граням сечения деревянного двутавра и в стальной трубе.

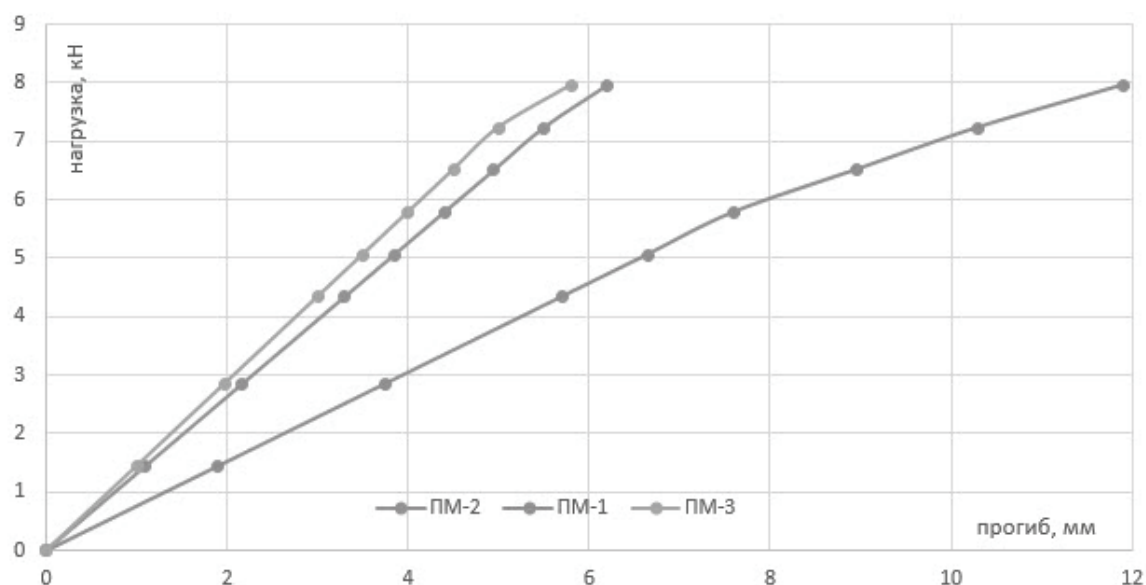


Рис. 8 График экспериментальных прогибов арочной полигональной конструкции

Из рисунков 9 и 10 видно, что в верхних точках сечения возникают сжимающие усилия, а в нижних растягивающие, при этом т.к. стальной элемент растягивается – нейтральная ось сечения смещена вверх. Максимальное нормальное напряжение в элементе слева первого узла (рис. 9) возникает в стальной трубе и составляет $1,12 \text{ кН/см}^2$, минимальное нормальное напряжение возникает в верхней полке – $0,37 \text{ кН/см}^2$. Максимальное нормальное напряжение в деревянном элементе возникает в нижней полке в верхней ее части (ТД 6) и составляет $1,01 \text{ кН/см}^2$, что можно объяснить неполной передачей перемещений по высоте сечения вследствие недостаточного сцепления материала нижней полки и фанерной стенки; в результате, вблизи узла нижняя полка работает как самостоятельный изгибаемый элемент верхние волокна которого сжимаются, а нижние растягиваются.

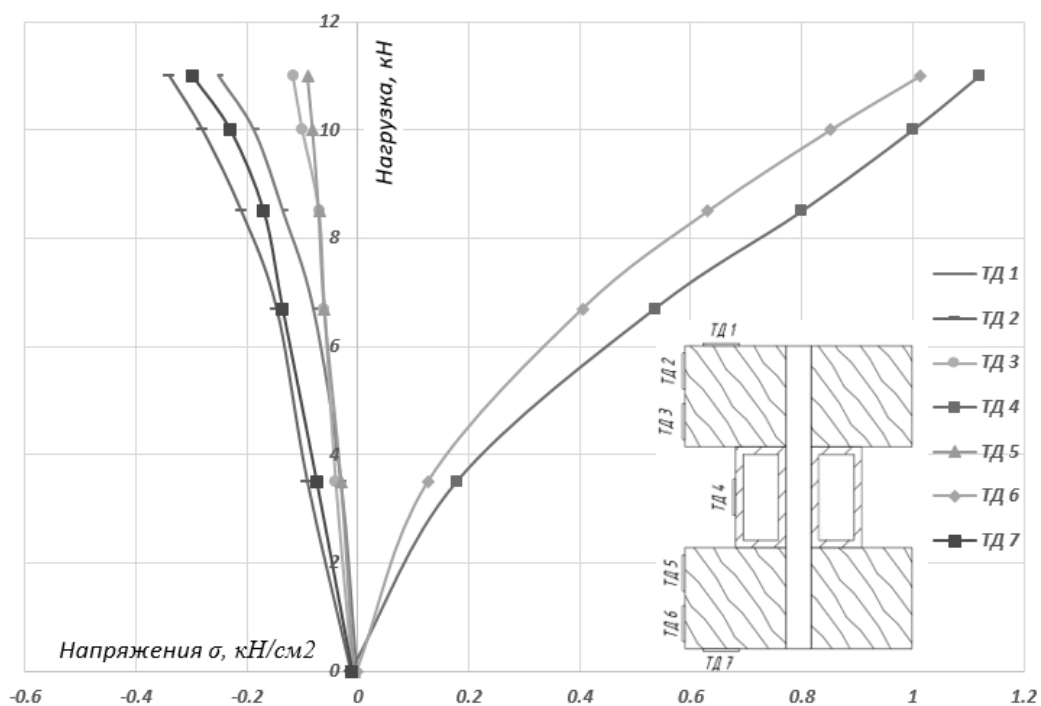


Рис. 9 График зависимости нормальных напряжений от нагрузки в узле 1, тензодатчики 1-7

В меньшей степени такое явление наблюдается и в работе правого элемента узла 1 (рис. 10) в креплении верхнего пояса к стенке (ТД 10), когда при нагрузках выше 5 кН нижняя часть бруса верхнего пояса переходит от сжатия к растяжению. Максимальное нормальное напряжение в элементе справа первого узла (рис. 10) возникает в нижнем поясе и составляет $1,98 \text{ кН/см}^2$, минимальное нормальное напряжение возникает в верхней полке – $0,32 \text{ кН/см}^2$. В стальной трубе возникают напряжения сжатия – $0,47 \text{ кН/см}^2$.

Характер распределения сжато-изгибных напряжений в 2м узле (рис. 7) конструкции в исследуемом сечении представлены на рисунках 11 и 12.

Судя по рис. 11 нейтральная линия в элементе слева 2 узла существенно ниже таковой 1 узла, что говорит о возросшем влиянии сжимающих (продольных) усилий. Максимальное нормальное напряжение в элементе слева второго узла (рис. 11) возникает в нижнем поясе (ТД 19) и составляет $2,6 \text{ кН/см}^2$, минимальное нормальное напряжение возникает в верхней полке (ТД 16) – $3,84 \text{ кН/см}^2$. В стальной трубе возникают напряжения сжатия – $0,9 \text{ кН/см}^2$. В месте расположения ТД 21 наблюдается всплеск сжимающих напряжений, что объясняется местными напряжениями, возникающими при деформации элемента в процессе передачи нагрузки от вышележащего элемента. В дальнейшем, при последующих нагружениях концентраций напряжений в месте расположения ТД 21 не наблюдалось.

По рис. 12 видно, что на протяжении всего эксперимента, практически во всех исследуемых точках монотонно увеличивались напряжения сжатия. Исключение составляет точка размещения датчика ТД28, в которой прибор регистрировал монотонное увеличение растягивающих напряжений. Объяснение такому поведению могут дать два явления: 1) на расстоянии между датчиками ТД27 (нижний датчик, регистрирующий сжатие) и ТД28 (регистрирующий растяжение) проходит нейтральная линия эпюры напряжений; 2) кручение вызывает деформацию сечения, в результате чего на столь малом участке регистрируются и сжатие, и растяжение. Максимальное нормальное напряжение в элементе справа второго узла (рис. 12) возникает в нижнем поясе и составляет $0,16 \text{ кН/см}^2$. Минимальное нормальное напряжение возникает внизу верхней полки (ТД24), что вызвано хорошим сцеплением (и, соответственно, передачей усилий) трубы и двутавра, и составляет – $1,24 \text{ кН/см}^2$. В стальной трубе возникают напряжения сжатия – $0,89 \text{ кН/см}^2$.

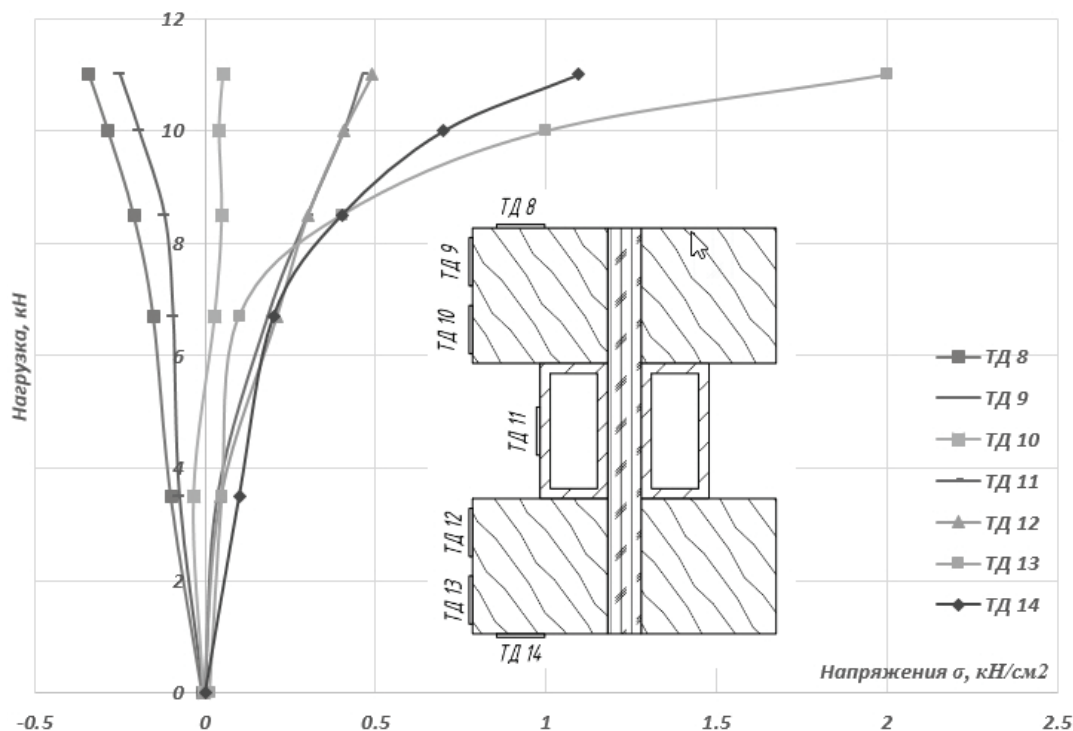


Рис. 10 График зависимости нормальных напряжений от нагрузки в узле 1, тензодатчики 8-14

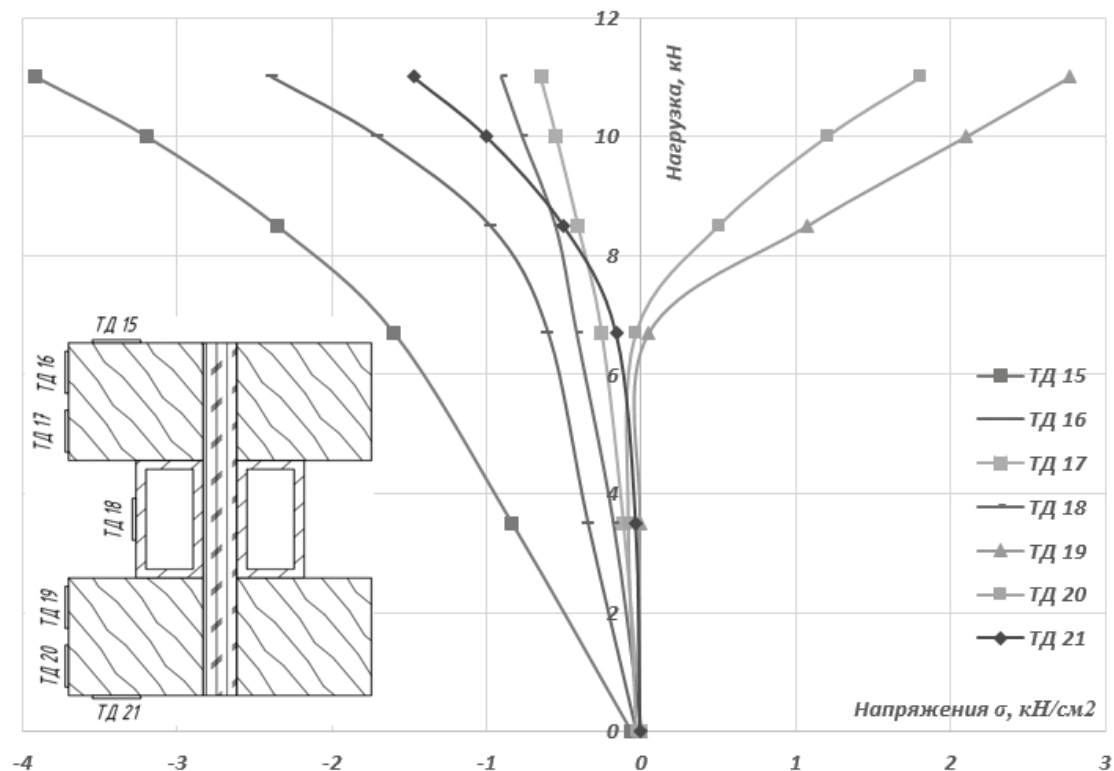


Рис. 11 График зависимости нормальных напряжений от нагрузки в узле 2, тензодатчики 15-21

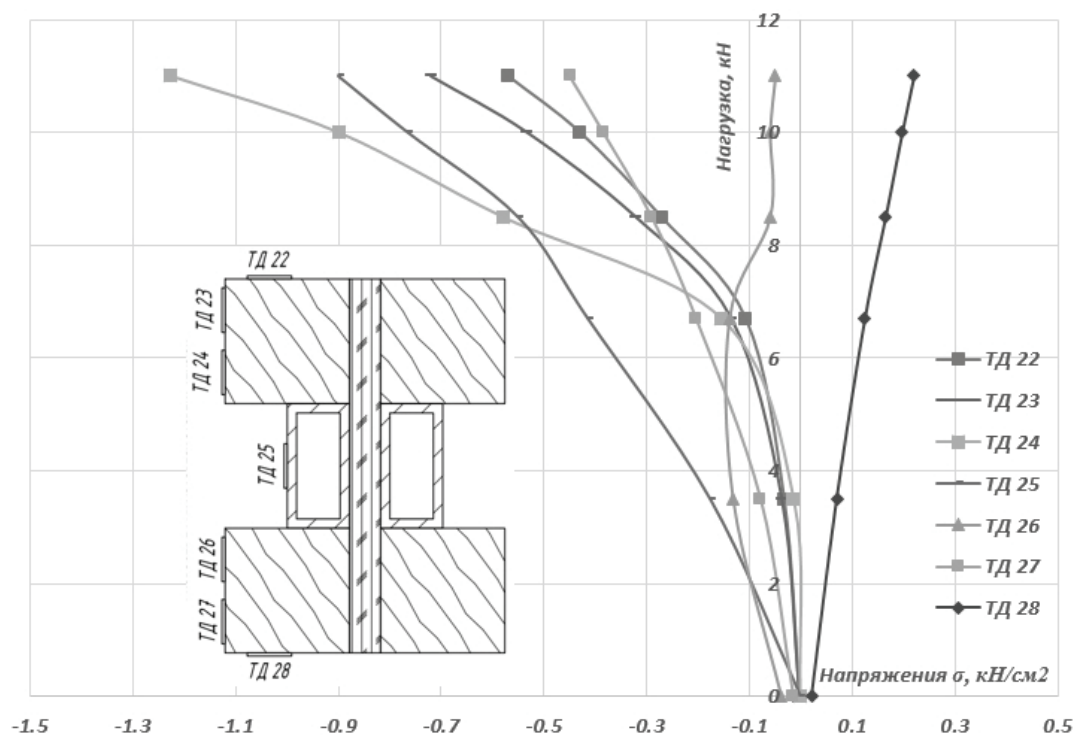


Рис. 12 График зависимости нормальных напряжений от нагрузки в узле 2, тензодатчики 22-28

Разница между значениями прогибов, определенных по программе ANSYS при действии расчетной нагрузки, и значениями прогибов полученных в ходе

экспериментальных исследований составляла не более 28% с учетом введения в результаты численных расчетов фактических модулей упругости древесины и 41% при использовании табличных характеристик. Расчет в ПК ЛИРА-САПР показал большие прогибы, а, следовательно, более близкие к эксперименту результаты. Т.о. неучитывание при расчете деформативности конструкции жестких металлических вставок – стальных труб привело к более реальной картине деформаций. Деформации, полученные по данным численных исследований в ПК ANSYS, имели меньшее значение. Такое расхождение можно объяснить тем, что при проведении численных исследований не учитывается податливость узлов и обжатие в деревянных элементах, присущие реальным конструкциям.

Также, экспериментальные прогибы в четвертях конструкции больше чем в расчете, что указывает на недостаточное натяжение или большую деформативность затяжки.

На рисунках 13 и 14 указаны эпюры распределения нормальных напряжений по высоте сечения исследуемой конструкции.

Как видно, характер распределения и величины напряжений в стальной трубе (рис. 13 а и б) практически одинаковы по результатам экспериментальных исследований и численного расчета. Напряжения, полученные в результате эксперимента незначительно выше таковых по численному расчету не более чем на 3%, объясняются меньшей степенью вовлеченности в общую работу деревянного двутавра. Также это можно заметить по напряжениям в верхней полке и стенке. Более близкого к экспериментальным данным результата расчета в ПК ANSYS можно добиться, решая контактную задачу, когда стальная труба прикреплена к стенке и полкам двутавра при помощи болтов. В настоящем исследовании между элементами был выбран контакт bonded, что обеспечивает жесткое соединение элементов по всем соприкасающимся поверхностям. Вследствие чего, напряжения в стенке по экспериментальным данным (достигающие $0,2 \text{ кН/см}^2$) ниже, полученных численным методом (до $0,35 \text{ кН/см}^2$) на 32% - 70%. Напряжения в верхней полке узла 1 по результатам эксперимента (до $0,33 \text{ кН/см}^2$) также были ниже чем полученные численным методом (до $0,38 \text{ кН/см}^2$) на 13%.

В узле 2 (рис. 13 а) разница напряжений в верхней полке по экспериментальным и численным методам достигает 64,8%. Причиной послужили местные напряжения сжатия. Для уменьшения напряжений в верхней полке модели был увеличен зазор между верхними полками смежных элементов, после чего напряжения в верхней полке составили $0,62 \text{ кН/см}^2$, что на 11% меньше расчетных величин.

Выводы

1. В целом, результаты изготовления опытных полигональных конструкций с размерами в плане $3,0 \times 1,0 \text{ м}$ свидетельствуют о высокой степени их технологичности, а также о возможности производства таких конструкций на действующих заводах КДК.

2. Критические напряжения, определенные в ПК меньше определенных экспериментально (максимальная разница 12%).

3. Расчет конструкции с узлами с металлическими трубами делает более правильной картину напряжений в конструкции, однако требует дополнительных исследований в области задания контактов узловых элементов для более точного определения деформаций конструкции.

4. Невыполнение условий к зазору между деревянными полками может оказать существенное влияние на характер распределения и величину напряжений в элементах арки.

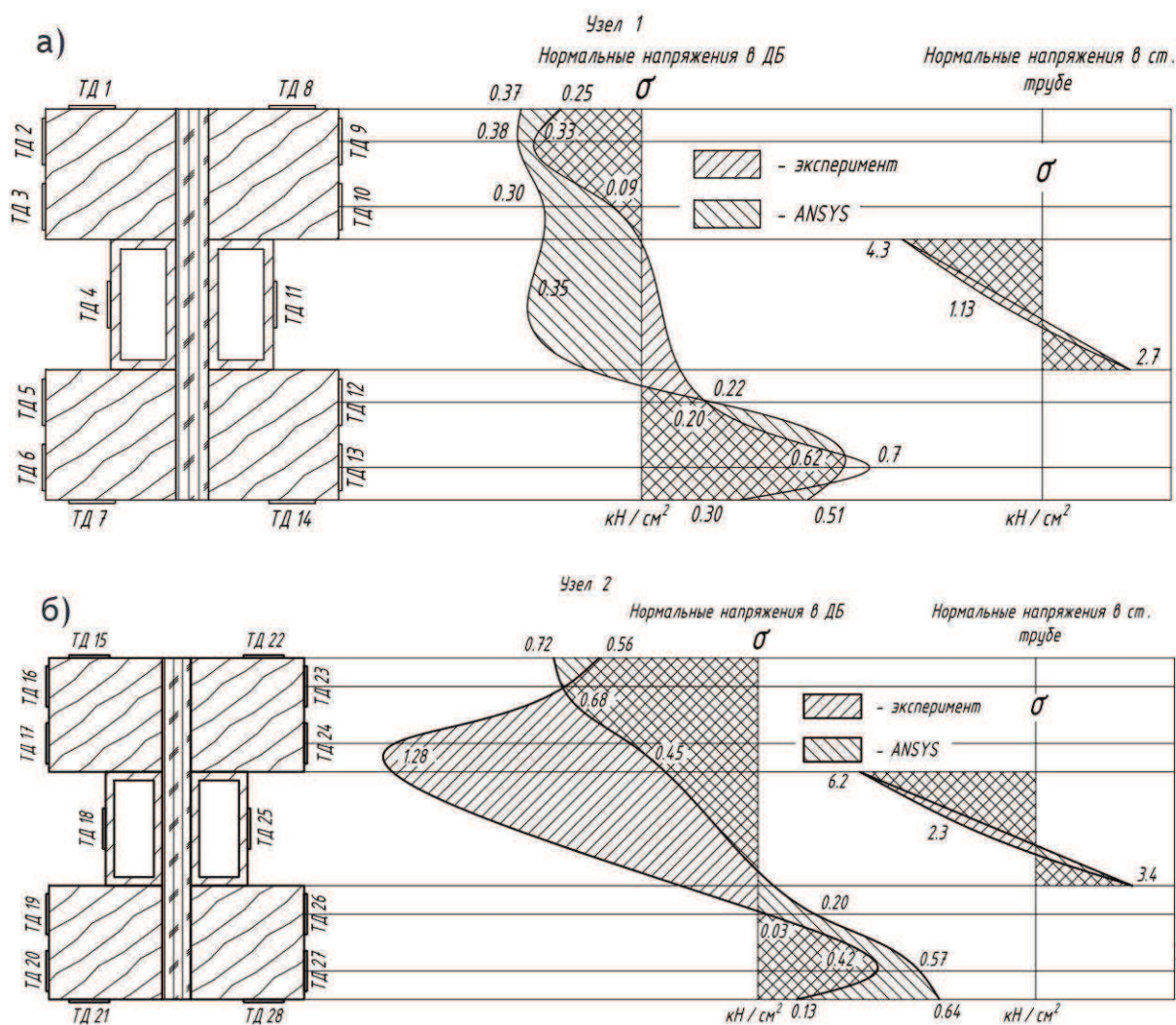


Рис. 13 К сравнению нормальных напряжений в узле 1 (а) и 2 (б) конструкции, полученных в ходе эксперимента и численным расчетом

Литература

1. Проектирование деревянных полигональных сводчатых покрытий / [О. В. Бойко, В. В. Стоянов, А. О. Бояджі та ін.]. // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2017. – №174. – С. 27–32.
2. ДБН В.2.6-161:2017 / ТОВ Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. – 117 с.
3. Серов Е.Н., Санников Ю.Д., Серов А.Е. Проектирование деревянных конструкций//Учебное пособие. – Москва, 2011.- 534с.
4. Золотухин Ю.Д. Испытание строительных конструкций. Выс.шк.-1983 г.
5. Стоянов В.В. Конструкции из дерева и пластмасс. Курс лекций. / Владимир Стоянов. – О.: ВРС, 2005.