



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2012, ТОМ 18, НОМЕР 1, 17–25

УДК 624.014.074.27

(12)-0256-1

РОБОТА ВУЗЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУКТУРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

С. В. Мітрофанов

*Національна академія природоохоронного та курортного будівництва,
вул. Київська, 181, м. Сімферополь, Україна, 95493.*

E-mail: arlekincool@mail.ru

Отримана 22 грудня 2011; прийнята 24 лютого 2012.

Анотація. Стаття присвячена результатам досліджень роботи елементів вузлових з'єднань структурних плит. Представлена нова конструктивна форма вузлів для структурних систем з квадратної труби, що дозволяє збирати структурні системи без порушення поверхневого захисного покриття (цинкового) стрижнів. Виконано теоретичні та чисельні дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів розроблених вузлових з'єднань. Чисельні дослідження проведені на створених комп'ютерних моделях вузлових з'єднань, які за геометричними і фізико-механічними характеристиками відповідали натурним зразкам. Як зовнішнє навантаження на елементи вузлового з'єднання прийняті зусилля, отримані з розрахунку структурної плити. Розрахунок зроблений для двох варіантів: стиснення або розтягнення поясів. Побудовано графіки і мозаїки розподілу напружень в елементах вузлового з'єднання. На основі мозаїк напружень обгрунтовані найбільш ймовірні схеми відмови вузлових з'єднань. Руйнування вузлового з'єднання структурної системи можливе в результаті втрати місцевої стійкості стінки трубчастих елементів під болтовим кріпленням або зрізу стінки у напрямку дії навантаження. Проведено експериментальні дослідження, які підтверджують близьку відповідність (розбіжності склали 10...25 %) ПДВ елементів вузлового з'єднання з результатами розрахунку комп'ютерних моделей. Експериментально підтверджені схеми відмови вузлів. Зроблено висновки за результатами досліджень.

Ключові слова: структури, вузол структури, стрижневі елементи, метод кінцевого елемента.

РАБОТА УЗЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРНОЙ КОНСТРУКЦИИ

С. В. Митрофанов

*Национальная академия природоохранного и курортного строительства,
ул. Киевская, 181, г. Симферополь, Украина, 95493.*

E-mail: arlekincool@mail.ru

Получена 22 декабря 2011; принята 24 февраля 2012.

Аннотация. Статья посвящена результатам исследований работы элементов узловых соединений структурных плит. Представлена новая конструктивная форма узлов для структурных систем из квадратной трубы, позволяющая собирать структурные системы без нарушения поверхностного защитного покрытия (цинкового) стержней. Выполнены теоретические и численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов разработанных узловых соединений. Численные исследования проведены на созданных компьютерных моделях узловых соединений, которые по геометрическим и физико-механическим характеристикам соответствовали натурным образцам. В качестве внешней нагрузки на элементы узлового соединения приняты усилия, полученные из расчета

структурной плиты. Расчет произведен для двух вариантов: сжатие либо растяжение поясов. Построены графики и мозаики распределения напряжений в элементах узлового соединения. На основании мозаик напряжений обоснованы наиболее вероятные схемы отказа узловых соединений. Разрушение узлового соединения структурной системы возможно в результате потери местной устойчивости стенки трубчатых элементов под болтовым крепежом либо среза стенки по направлению действия нагрузки. Проведены экспериментальные исследования, которые подтверждают близкое соответствие (расхождения составили 10...25 %) НДС элементов узлового соединения с результатами расчета компьютерных моделей. Экспериментально подтверждены схемы отказа узлов. Сделаны выводы по результатам исследований.

Ключевые слова: структуры, узел структуры, стержневые элементы, метод конечного элемента.

WORK SITES ELEMENTS OF STRUCTURAL DESIGN

Sergey Mitrofanov

National Academy of Environmental Protection and Resort Development,

181, Kievskaiia Str., Simferopol, Ukraine, 95493.

E-mail: arlekincool@mail.ru

Received 22 Desember 2011; accepted 24 February 2012.

Abstract. The article is devoted to results of studies of the structural elements of the nodal connection plates. A new form of structural components for the structural systems of the square tube that collects the structural system without breaking the surface of the protective coating (zinc) rods. Theoretical and numerical studies of the stress-strain state (SSS) elements developed nodal connections. Numerical investigations were carried out on computer models created by the node connections that are on the geometric and physical-mechanical characteristics consistent with full-scale models. As the external load on the node connecting elements made efforts, derived from the calculation of the structural slab. Calculation is made for the two options: compression or stretching of belts. The graphs and mosaic distribution of stresses in the elements of a node connection. Based on the mosaics stress most likely grounded circuit failure node connections. The destruction of joints for structural system with possibly as a result of loss of local stability of the wall of the tubular elements under the bolt fastener or shear walls in the direction of the load. Experimental studies that confirm a close match (difference amounted to 10...25 %) VAT element nodal connection with the calculation results of computer models. Experimentally validated circuit failure nodes. Conclusions based on research findings.

Keywords: structure, site structure, core elements of a finite element method.

Постановка задачи

После распада Советского Союза основная часть заводов по производству элементов для легких структурных конструкций осталась на территории России. Возможности Украины по быстрому наращиванию производственных мощностей по производству конструкций из эффективных быстровозводимых структурных покрытий значительно снизились [13]. К этому времени появилась необходимость в разработке зданий с низкой металлоемкостью с уменьшенной сетки колонн и эффективным защитным покрытием всех элементов структур-

ных конструкций для снижения эксплуатационных расходов здания [12, 14, 15].

Разработанная, при участии автора, структурная конструкция покрытия, с ячейкой средних размеров, позволяет ускорить выпуск конструкций покрытия, которые имеют высокую скорость изготовления, защитное покрытие и минимальные эксплуатационные расходы. Структурная конструкция покрытия размерами в плане 21×21 м и ячейкой размерами 2,1×2,1 м разработана для климатических условий центра и юга Украины. В качестве стержневых элементов применены трубы квадратного сечения, имеющие защитное покрытие

(цинковое), которые в большом количестве выпускаются на территории Украины.

Для применения квадратной трубы в качестве стержней структурной конструкции разработан узловой элемент (рис. 1), состоящий из двух штампованных пластинок 1, 2. Пластина 1 расположена с верхней стороны узла, а пластина 2 расположена с нижней стороны узла. Пластины узла структурной системы деформированы, так что они охватывают каждый стержень 4, входящий в узел, и создают пространство для установки стержней, ограниченное упорами 5. В верхней и нижней пластинах выполнены отверстия. Отверстия в верхней и нижней пластинах и стержневом элементе соосно совпадают. В них устанавливают болтовое крепёж 3, с помощью которого все элементы закреплены в узле. Каждый стержень имеет возможность перемещаться только вдоль своей оси, но в этом направлении его перемещение ограничивает болт. Повороты стержней относительно болта ограничены упорами, созданными штамповкой пластин. На данное техническое решение получен патент Украины [4].

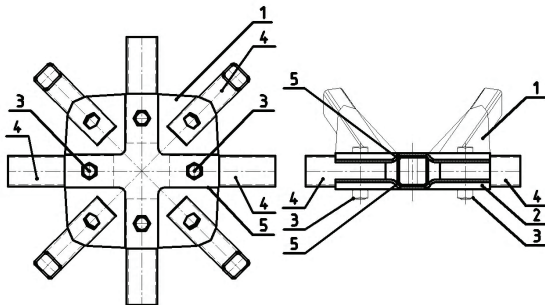


Рисунок 1. Узловое соединение структурной системы: 1 – верхняя пластина; 2 – нижняя пластина; 3 – болтовое соединение; 4 – стержневой элемент; 5 – упоры.

Для небольших пролетов структурных плит покрытия можно принять одинаковыми размеры поперечных сечений поясов и раскосов. Так для поясов может быть принята квадратная труба 50×50 мм с толщиной стенки от 2...6 мм. Гибкость сжатых стержней при сетке $2\ 100 \times 2\ 100$ мм окажется близкой к 100. Для раскосов может быть принята квадратная труба 40×40 мм с толщиной стенки от 2...4 мм. Гибкость таких элементов будет меньше предельной [5].

Цель исследования

Проверка прочности элементов узловых соединений структурных конструкций на проектные нагрузки и определение наиболее вероятных схем отказа.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать компьютерные модели узла соединения структурной системы, определить их напряженно-деформированное состояние (НДС) и возможные схемы разрушения элементов узлового соединения;
- изготовить и провести испытания новых натуральных узлов соединения стержней структурных систем для определения НДС и основных схем разрушения;
- выполнить сопоставление и анализ численных и экспериментальных исследований узлов и схем их разрушения.

Исследование напряженно-деформированного состояния элементов начинаем с определения значений критических усилий для отдельно взятого элемента узлового соединения.

Узловое соединение структурных систем состоит из тонкостенных стержней, пластинчатых элементов и крепежа узлового соединения, поэтому рассмотрим определение критической силы для каждого из вышеперечисленных элементов.

Так, для растянутого стержня критическая сила будет выражаться уравнением [7]:

$$N_{cr1} = R_y A.$$

Критическая сила для сжатого стержня будет определяться системой из трех уравнений, решение которой даст нам три Эйлеровские силы, минимальная из которых и будет критической [6, 11]:

$$F_1 = I_x \lambda^2; F_2 = I_y \lambda^2;$$

$$F_3 = \frac{F_\omega r^2}{r^2 + 2\beta_x \alpha_x + 2\beta_y \alpha_y}.$$

$$N_{cr2} = N_{\min}(F_x, F_y, F_3).$$

Для определения предельной несущей способности узлового элемента рассмотрена задача устойчивости пластины с заданными граничными условиями и прикладываемой нагрузкой.

Критическая сила будет соответствовать уравнению [8]:

$$N_{cr3} = -\frac{kD}{b^2};$$

$$k = \pi^2 \left(m \frac{b}{a} + \frac{a}{mb} \right).$$

Несущая способность болтового соединения на срез и смятие определяется выражениями:

$$N_{cr41} = R_{bs} A_{bs} n_s \gamma_b - \text{на срез};$$

$$N_{cr42} = R_{bp} d \sum t_{\min} \gamma_b - \text{на смятие.}$$

$$N_{cr2} = N_{\min}(N_{41}, N_{42}).$$

Равнопрочность нашей структурной конструкции достигается при близком значении всех рассмотренных выше усилий [11].

Для изучения работы системы узловое соединение – стержневой элемент рассмотрены существующие методы расчета с применением метода конечных элементов.

Для определения НДС и возможных схем отказа была создана модель узлового соединения структурной конструкции на основе прямоугольного и треугольного конечных элементов (КЭ). С помощью этих КЭ были созданы все детали стержневого и узлового элементов. Компьютерная модель по геометрическим и жесткостным характеристикам соответствует элементам натурного узла (рис. 2).

Для определения максимальных усилий был выполнен расчет структурной конструкции размерами в плане 21×21 м, с размером ячейки 2,1×2,1 м. Силы, приложенные к

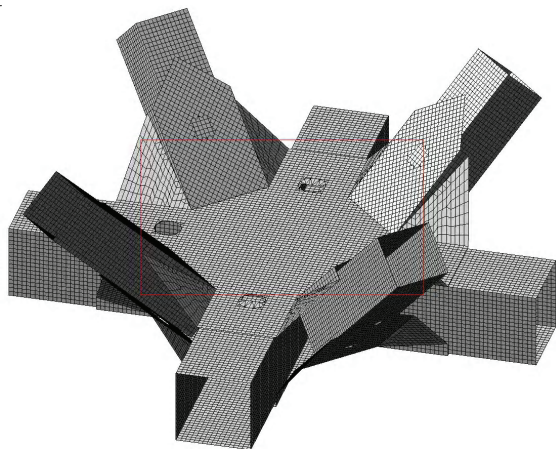


Рисунок 2. Узловое соединение структурной системы.

структурной конструкции, соответствовали климатическим условиям центра и юга Украины [9, 10].

В результате расчета получены усилия в стержневых элементах структурной конструкции и выбраны максимальные растягивающие и сжимающие усилия.

Расчет производили при условии ступенчатого приложения осевой сжимающей и растягивающей нагрузки на два противоположно расположенных стержневых элемента модели, эмитирующие поясные стержни структурной системы. Нагрузку прикладывали на торцы стержневых элементов таким образом, чтобы суммарная нагрузка каждой ступени была равна нагрузке полученной при расчете структурной конструкции.

При численном исследовании [3] на сжатие получили, что распределение нормальных напряжений по длине фасонки узлового соединения структуры не равномерно. Продольные напряжения имеют максимальное значение у мест расположения болтовых соединений и уменьшаются к центральной части узла. Уровень продольных сжимающих напряжений у мест расположения болтового крепежа достигает величин смятия металла и достаточно велик в других конечных элементах нижних фасонках. Поперечные напряжения нижних фасонках на участке между болтами имеют знакопеременный характер. График отображает характер напряжений, возникающих по наиболее нагруженной плоскости элемента. Плоскость проходит через болтовые соединения и центр стержневого элемента (рис. 3а).

При численном исследовании на растяжение получили, что максимальными напряжениями являются напряжения растяжения. Их максимальная величина возникает в конечных элементах вблизи отверстия, расположенных на его диаметрально противоположных участках перпендикулярно от направления действующей нагрузки. График отображает характер напряжений, возникающих по наиболее нагруженной плоскости элемента (рис. 3б).

По величине напряжения σ_x превышают прочность металла на разрыв, и очевидно здесь будут зарождаться трещины. В месте контакта болта со стержневым элементом по направлению действующей нагрузки возникают

большие локальные напряжения, близкие к прочности металла на смятие. Далее расположена зона, в которой возникают напряжения сжатия достаточно большой величины. Эта область распространяется от места расположения болтового соединения по направлению действующей нагрузки к свободному торцу эле-

мента. Наиболее вероятным разрушением этого элемента будет – вырыв (рис. 3б).

Графики зависимости деформаций смещения стержневых элементов от осевых нагрузок для узловых соединений 1 и 2 представлены на рис. 4. На первой стадии работы происходят смещения нагружаемых элементов, связанные

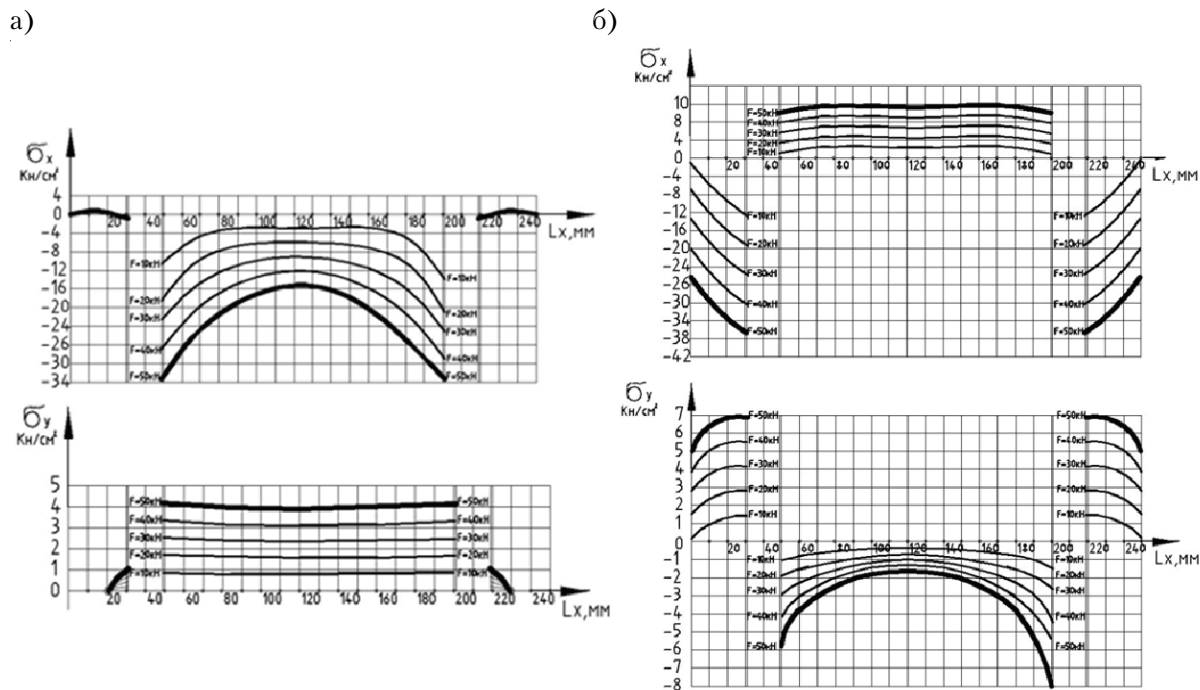


Рисунок 3. Графики распределения напряжений в узловом элементе на сжатие и растяжение: а – нормальные напряжения σ_x и σ_y в нижней фасонке узла, при сжатии; б – нормальные напряжения σ_x и σ_y в нижней фасонке узла, при растяжении.

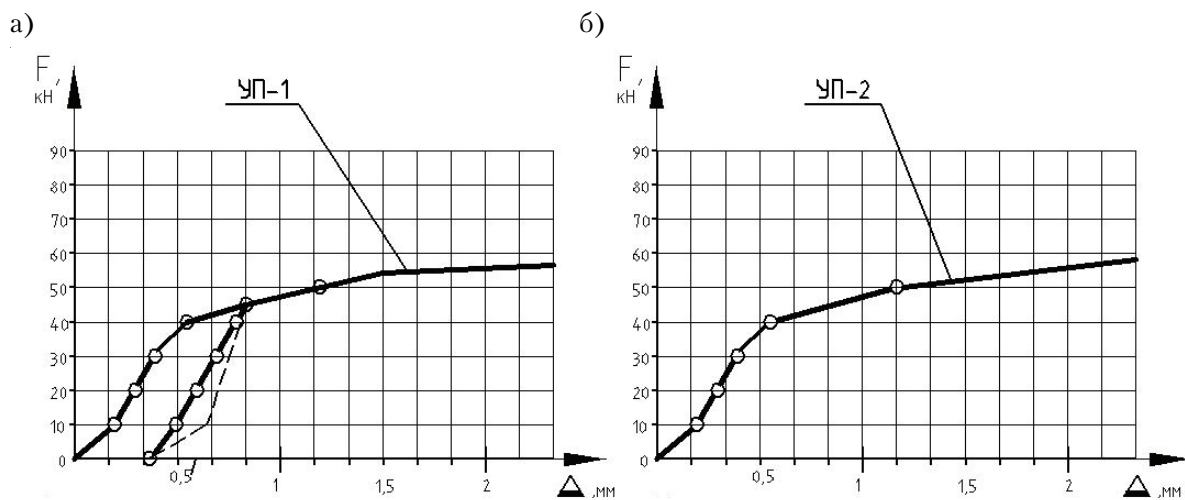


Рисунок 4. Графики зависимости деформаций смещения стержневых элементов в узловых соединениях структурной системы покрытия от сжимающих нагрузок: а – первое узловое соединение; б – второе узловое соединение.

с податливостью болтового соединения. Эти смещения не большие, поскольку при центровке образца основная величина этих смещений была выбрана. На второй стадии соединение работает упруго, деформации узла пропорциональны прикладываемой нагрузке на узел. На третьей стадии работы при нагрузке более 45 кН появляются неупругие деформации узлового соединения. Это связано со смятием металла стенок стержней, а также деформациями изгиба и смятия болта.

На четвертой стадии работы соединение переходит в упруго пластическую стадию работы, увеличиваются деформации смятия металла на границе контакта болта и отверстия, а также в крайних фибрах нагружаемых пластин критические напряжения достигают напряжений, равных напряжениям предела текучести. Причиной разрушения узловых соединений является смятие металла стенок стержневых элементов в месте контакта с болтом.

Испытания узловых соединений на сжатие выполняли в прессе ПГ-125 (рис. 5).

При первой ступени нагружения зафиксированы деформации смещения элементов, равные 0,3 мм. На второй, третьей и последующих ступенях загрузки деформации смещения

элементов узлового соединения уменьшились. Показания приборов свидетельствовали о том, что соединение работает в упругой стадии. Изменений деформаций при выдержке узлового соединения под нагрузкой не происходило (рис. 6).

При пятой ступени нагружения индикаторы показали увеличение деформаций взаимного смещения стержневых элементов узлового соединения.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к потере местной устойчивости деформированного торцевого участка стержня. Потеря местной устойчивости вызвала поперечные деформации стенок стержневого элемента.

Сопоставление результатов численных и экспериментальных исследований показало, что наиболее вероятной формой отказа структурной системы будет смятие и последующий выкол стенки стержневого элемента в направлении действия нагрузки (рис. 7).

Выводы:

1. Разработаны узловые соединения структурных конструкций покрытия со стержневыми элементами, выполненными из тонко-

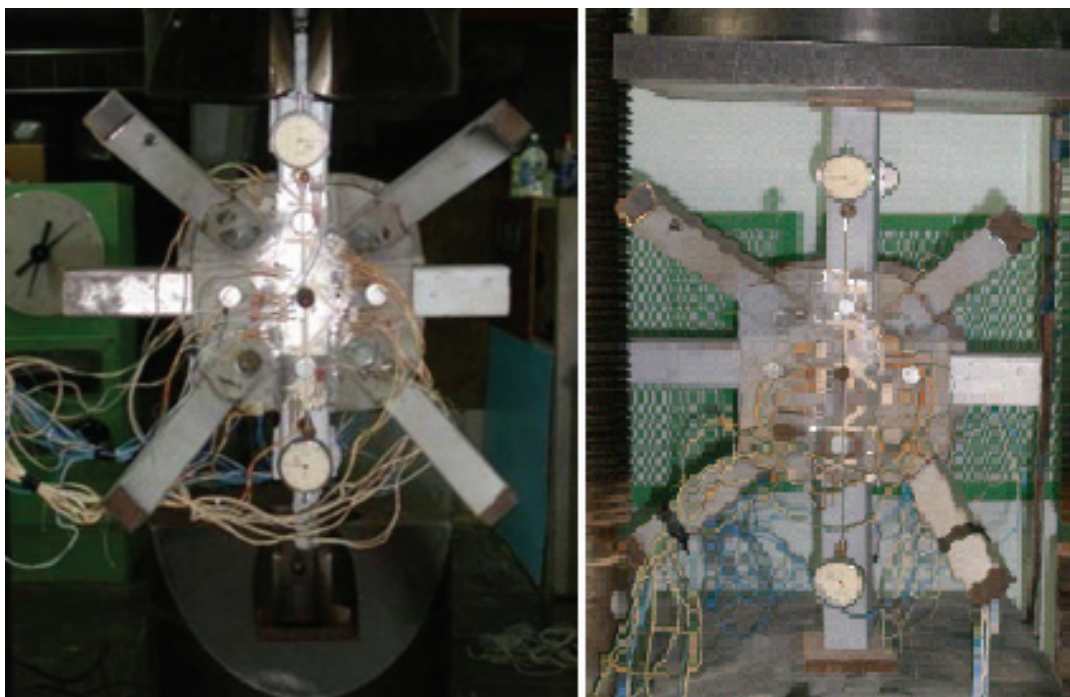


Рисунок 5. Процесс испытания узлового соединения на растяжение и сжатие.

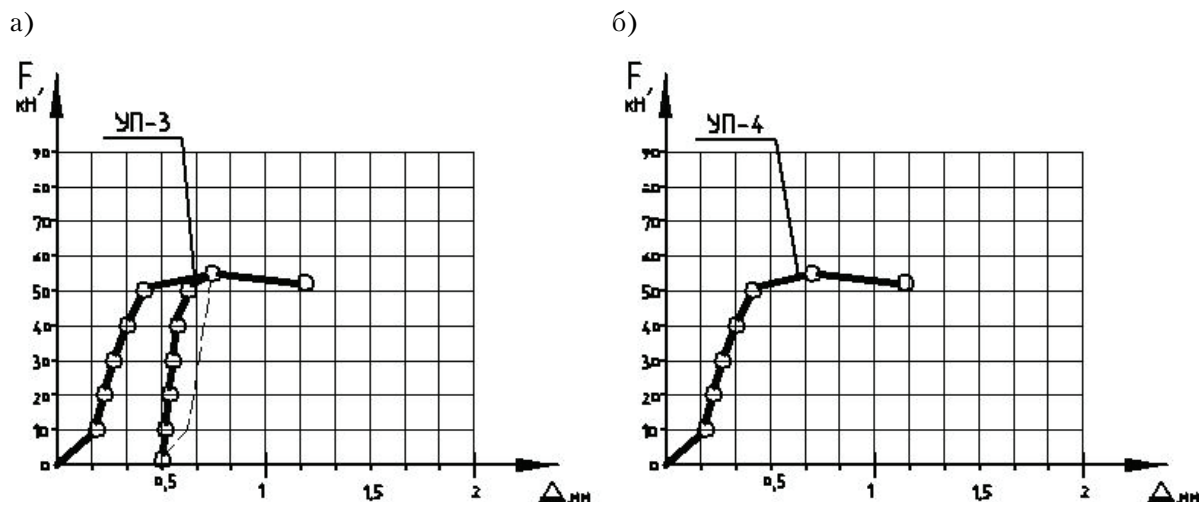


Рисунок 6. Графики зависимости деформаций смещения стержневых элементов в узловых соединениях структурной системы от растягивающей нагрузки: а – узловое соединение 3; б – узловые соединения 4.

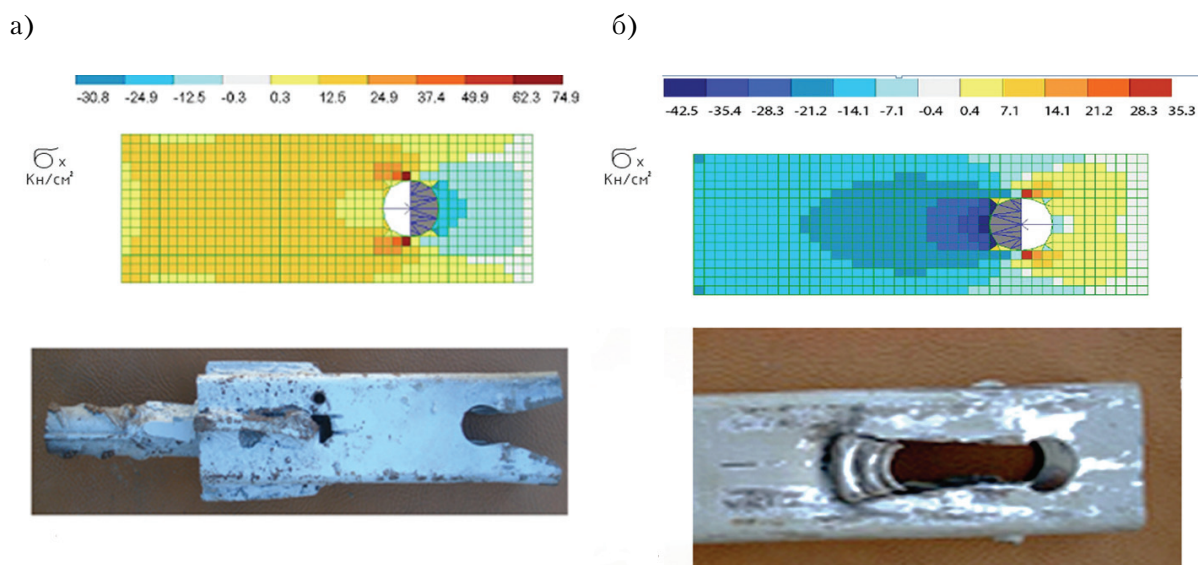


Рисунок 7. Сопоставление численных и экспериментальных исследований: а – растяжение, б – сжатие.

- стенных квадратных труб с защитным покрытием.
2. Прочность верхней и нижней пластин узловых соединений структурной конструкции достаточна при расчетных нагрузках.
 3. Причиной разрушения узловых соединений структурной конструкции при действии осевых усилий является смятие и последующий выкол стенки стержневого элемента. Разрушающие нагрузки при экспериментальных испытаниях незначительно превы-

- шают расчетные усилия, полученные на компьютерных моделях узловых соединений.
4. Анализ напряженно-деформированного состояния узлов, проведенный на электронных моделях, позволяет с достаточной точностью прогнозировать наиболее вероятный отказ узлового соединения. Характер разрушения узлов, проведенный на электронных моделях, совпадает с результатами, полученными при натурных испытаниях узлов.

Литература

1. Трофимов, В. И. Структурные конструкции [Текст] / В. И. Трофимов, Г. Б. Бегун. – М. : Стройиздат, 1972. – 172 с.
2. Файбишенко, В. К. Металлические перекрестно стержневые пространственные конструкции покрытий [Текст] / В. К. Файбишенко // Обзорная информация. Серия Строительные конструкции. – М. : ВНИИТПИ, 1990. – Выпуск. 6. – С. 83.
3. Пакеты прикладных программ для автоматизированного проектирования конструкций [Текст] / М. С. Барабаш, Ю. Д. Гераймович, А. Н. Кекух [и др.]; Под ред. Академика РААСН А. С. Городецкого. – К. : Факт, 2006. – 112 с.
4. Вузлове з'єднання просторової стрижневої конструкції [Текст] : пат. 28673 Україна : МПК (2006) E04B 1/38 / Митрофанов В. О., Сінцов В. П., Митрофанов С. В., Митрофанов О. В. ; власник Митрофанов В. О. – u 2007 02796 ; заявл. 16.03.2007 ; опубл. 25.12.2007, Бюл. 21. – 4 с.
5. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции : СНиП II-23-81*. – Взамен СНиП II-В.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67 ; введ. 1982-01-01. – М. : ФГУП ЦПП, 2005. – 90 с.
6. Власов, В. З. Тонкостенные пространственные системы [Текст] / В. З. Власов. – М. : Физматгиз, 1959. – 568 с.
7. Розин, Л. А. Задачи теории упругости и численные методы их решения [Текст] / Л. А. Розин. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГТУ, 1998. – 530 с.
8. Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела [Текст] / С. Г. Лехницкий. – М. : Наука, 1977. – 415 с.
9. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
10. Державні будівельні норми. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст] : ДБН В.1.2-2:2006. – Замість СНиП 2.01.07-85 ; надано чинності 2007-01-01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 61 с.
11. Хисамов, Р. И. Расчет и конструирование структурных покрытий [Текст] / Р. И. Хисамов. – К. : Будівельник, 1981. – 79 с.
12. Charleson, Andrew. Structure as architecture: a source book for architects and structural engineers [Текст] / Andrew Charleson. – Elsevier: Architectural Press, 2005. – 228 p.
13. Space structures 4. Volume 1 [Текст] / Edited by G. A. R. Parke, C. M. Howard. – London : Thomas Telford, 1993. – 1031 p.
14. Makowski, Z. S. Raumliche Tragwerke aus Stahl [Текст] / Z. S. Makowski. – Dusseldorf : Stahleisen, 1963. – 207 p.
15. Mainstone, Rowland J. Structure in architecture: history, design and innovation [Текст] / Rowland J. Mainstone. – Aldershot : Ashgate, 1999. – 423 p.

Reference

1. Trofimov, V. I.; Begun, G. B. Structural constructions. Moscow: Stroiizdat, 1972. 172 p. (in Russian)
2. Faibishenko, V. K. Metal grid structures of coverages. In *Background information. Series Building constructions*. Moscow: VNIINTPI, 1990. Vol. 6, p. 83. (in Russian)
3. Barabash, M. S.; Geraimovich, Yu. D.; Kekuh A. N. et al. Ed. A. S. Gorodetskii. Application programs for automated engineering of constructions. Kyiv: Fakt, 2006. 112 p. (in Russian)
4. Mitrofanov, V. O.; Sintsov, V. P.; Mitrofanov, S. V.; Mitrofanov, O. V. Connection of space framework. Patent 28673 Ukraine: МПК (2006) E04B 1/38; owner Mitrofanov V. O. No. u 2007 02796; declaration 16.03.2007; published 25.12.2007, Bul. No. 21. 4 p. (in Ukrainian)
5. Structural Rules and Regulations. Steel structures: SNiP II-23-81*. Moscow: FGUP TsPP, 2005. 90 p. (in Russian)
6. Vlasov, V. Z. Thin-walled space systems. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 568 p. (in Russian)
7. Rozin, L. A. Elasticity problems and numeral computations. St. Petersburg: SPbGTU, 1998. 530 p. (in Russian)
8. Lehnitskii, S. G. Elastic theory of anisotropik body. Moscow: Nauka, 1977. 415 p. (in Russian)
9. Textbook of steel work designing (to SNiP II-23-81* «Steel structures»). Moscow: TsITP Gosstroia SSSR, 1989. 148 p. (in Russian)
10. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects: DBN B.1.2-2:2006. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 61 p. (in Ukrainian)
11. Hisamov, R. I. Analysis and design of structural coverage. Kiyv: Budivelnyk, 1981. 79 p. (in Russian)
12. Charleson, Andrew. Structure as architecture: a source book for architects and structural engineers. Elsevier: Architectural Press, 2005. 228 p.
13. Parke, G. A. R.; Howard, C. M. (eds). Space structures 4. Volume 1. London: Thomas Telford, 1993. 1031 p.
14. Makowski, Z. S. Raumliche Tragwerke aus Stahl. Dusseldorf: Stahleisen, 1963. 207 p.
15. Mainstone, Rowland J. Structure in architecture: history, design and innovation. Aldershot: Ashgate, 1999. 423 p.

Мітрофанов Сергій Володимирович – асистент кафедри металевих і дерев'яних конструкцій Національної академії природоохоронного та курортного будівництва. Наукові інтереси: структурні системи покриття, опорні конструкції морських сталевих стаціонарних платформ.

Митрофанов Сергей Владимирович – ассистент кафедры металлических и деревянных конструкций Национальной академии природоохранного и курортного строительства. Научные интересы: структурные системы покрытия, опорные конструкции морских стальных стационарных платформ.

Sergey Mitrofanov – assistant of the Metal and Wooden Structures Department of the National Academy of Environmental Protection and Resort Development. Research interests: include the structure of the coating system, steel support structures offshore stationary platforms.