

лентных напряжений (рис. 3), которые достигают своего максимального значения при нагрузке 480 кН (рис. 3б). Возрастают эквивалентные напряжения и по оси затяжки, в результате чего при нагрузке 480 кН кривизна поверхности стенки затяжки преобразуется из положительной в отрицательную. Как показывает построенная диаграмма деформирования, стык работает упруго до нагрузки $N = 450$ кН (рис. 2б), что на 18% меньше экспериментального значения. В целом, результаты моделирования подтверждают, что разрушение образца происходит в кольцевой зоне стыка со стороны затяжки, где эквивалентные напряжения достигают своего максимального значения.

Для уточнения реальной работы узла стыка затяжки с подвеской в конструкции покрытия было произведено его моделирование в упругопластической стадии работы. Т-образное соединение из труб исследовалось при двусосном растяжении на расчетные нагрузки. На основании анализа установлено, что при увеличении нагрузки вокруг сварного шва со стороны затяжки также формируется характерная кольцевая зона с высоким уровнем эквивалентных напряжений, которые достигают своего максимального значения при продольном усилии в затяжке 850 кН. Пластические деформации появляются только в кольцевой зоне вокруг сварного шва со стороны затяжки при усилии в затяжке 800 кН. Однако, в отличие от одноосного растяжения, по оси затяжки эквивалентные напряжения в стенке не достигают критических значений, стенка работает упруго и сплющивания трубы не происходит, что подтверждается изополями распределения пластических деформаций (рис. 4е).

Заключение

1. Экспериментальные исследования крестообразных стыков труб на одноосное растяжение показали, что разрушение всех образцов произошло в зоне термического влияния сварного шва со стороны затяжки. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показывает, что результаты достаточно хорошо согласуются.
2. Проведены численные исследования напряженно-деформированного состояния Т-образных и крестообразных соединений труб в упругопластической стадии работы узлов. В результате выполненных в работе численных исследований установлено:
 - максимальными являются эквивалентные напряжения по 4-й категории прочности (Губера–Мизеса–Генки), которые достигают своего максимального значения в кольцевой зоне стыка затяжки с подвеской со стороны затяжки при нагрузке $N = 480$ кН для крестообразного, и $N = 880$ кН для Т-образного соединения. Наибольшего значения эквивалентные напряжения достигают в точке перехода от стыкового шва к угловому со стороны затяжки;

- результаты моделирования крестообразных стыков труб согласуются с экспериментальными данными. Имеющие место отличия объясняются сложностью учета при формировании КЭ-модели формы сварного шва в зоне стыков труб и свойств материала в зоне его термического влияния.
- при одноосном нагружении крестообразных стыков труб, при дальнейшем увеличении нагрузки, по оси поясной трубы формируется зона концентрации эквивалентных напряжений, в результате кривизна поверхности стенки трубы преобразуется из положительной в отрицательную. Двусосное нагружение уменьшает концентрацию напряжений по оси поясной трубы, в результате сплющивания стенки трубы в Т-образном соединении не происходит.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абаринов, А.А. Особенности работы и расчета ферм из труб / А.А. Абаринов, Н.Б. Козьмин, А.Ф. Кузнецов // *Архитектура и строительство*. – 1975. – № 4. – С. 32–36.
2. Драган, В.И. Исследование, расчет и испытание большепролетного металлического покрытия здания универсального спортивного комплекса в г. Бресте / В.И. Драган, А.Б. Шурин, А.В. Мухин, И.В. Зинкевич, Л.Г. Головки // *Архитектура и строительство* – 2005: сб. трудов I междунар. науч.-практического семинара, Брест, 22–23 сентября 2005. – Брест, 2005.
3. Драган, В.И. Обеспечение надежности комбинированного покрытия универсального спортивного комплекса в г. Бресте / В.И. Драган, А.Б. Шурин // *Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: XIV Международный научно-практический семинар, Минск, 22-23 июня 2006 г.* / БНТУ. – Минск, 2006.
4. Диденко, В.Н. Исследование узлов трубчатых ферм при перпендикулярном примыкании элементов / В.Н. Диденко // *Архитектура и строительство*. – 1976. – № 5. – С. 41–42.
5. Ильясевич, С.А. Усталостная прочность сварных узлов трубчатых конструкций / А.С. Ильясевич, В.М. Горпиченко // *Архитектура и строительство*. – 1973. – № 2. – С. 41–43.
6. Решетников Б.Н. Результаты испытания моделей стальных стропильных ферм из высокопрочных труб / Б.Н. Решетников, А.М. Ривкин // *Архитектура и строительство*. – 1975. – № 3. – С. 31–35.
7. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). – М.: ЦИТП, 1989. – 128 с.

09.02.10

DRAGAN V.I., SHURYN A.B., ZINKEVICH I.V. The work of T-shaped and cross nodal connections of round pipes in an elastoplastic stage.

The results of experimental and numerical researches of T-shaped and cross nodal connections of round pipes in the elastoplastic stage are given. The zones of concentration of equivalent tensions in an annular zone around a welded joint are defined.

624.014.27(476.7)

. " . " . " . .

Введение. Покрытие бассейна и аквапарка в г. Пружаны выполнено в виде стальной цилиндрической структурной оболочки, по верхним поясам которой уложен сплошной деревянный настил. Структурная оболочка с кристаллом в виде пирамиды с ромбическим основанием 2,156×2,156 м по верхним поясам имеет высоту по центрам узлов 2,6 м. Оболочка опирается нижними узлами на железобетонные и сталежелезобетонные колонны (рис. 1). При этом, при-

нимая во внимание конструктивное решение узлов, отметим, что сопряжение является жестким. Стрела подъема оболочки в середине пролета (вдоль длинной стороны), принятая как расстояние между центрами нижних узлов, составляет 5 м.

Особенностями разработанного в ОАО «Брестпроект» стального структурного покрытия, для которого в качестве верхних поясов применяются квадратные трубы холодного формования, являются:

Мухин Анатолий Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Люстибер Вадим Викторович, ст. преподаватель кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

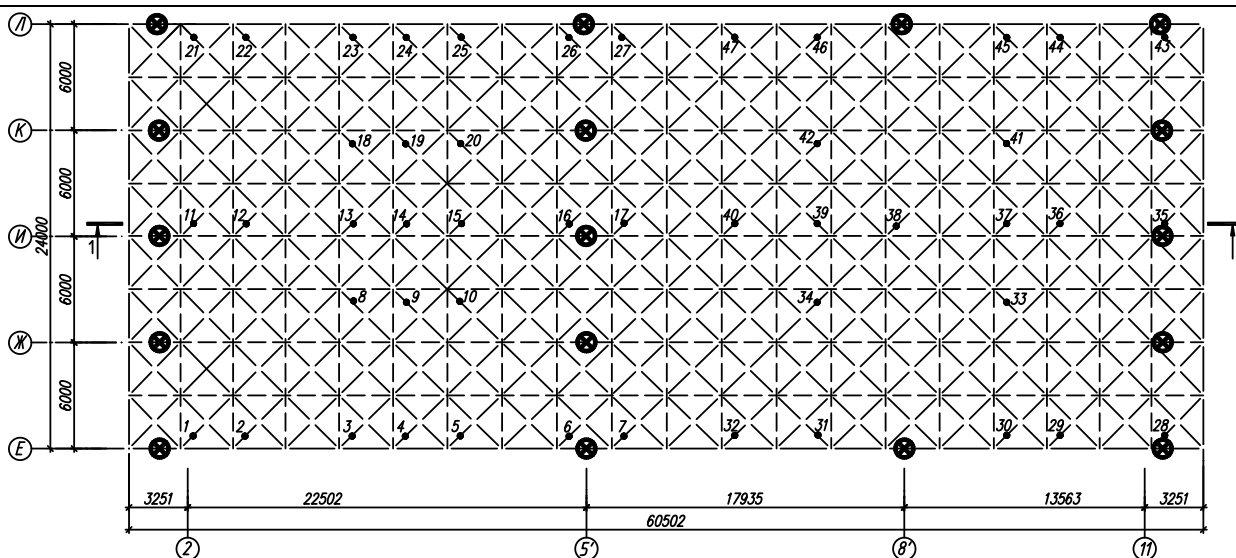


Рис. 1. Места опирания структурной оболочки и местоположение точек нивелирования верхней поясной сетки

а.



б.



Рис. 2. Дефекты монтажа узлов верхней поясной сетки структурной оболочки (раскрытие фланцев)

использование для образования кристаллов структуры укрупнённых сварных треугольных и ромбических рамок, восприятие верхним поясом распределенной нагрузки от покрытия, применение для верхней поверхности покрытия сплошного деревянного настила из досок на шпунтах, прикрепленного на самонарезающих винтах. При этом сборочные марки соединены между собой в узлах болтами и шпильками с предварительным контролируемым натяжением, образуя тем самым фрикционные соединения.

Наличие значительного числа неясностей в работе конструкции, а также присутствие в ней узла, в котором с помощью всего лишь одной предварительно напряжённой шпильки создается фрикционное соединение, отсутствие методики расчёта таких узлов, а также их экспериментальных и численных исследований, наличие дефектов изготовления и монтажа потребовало проведения натурных испытаний. Целью испытаний являлось определение действительного напряженно-деформированного состояния и оценка пригодности конструкции покрытия к эксплуатации.

Результаты обследования покрытия оболочки. В процессе обследования установлено, что изготовленные и поставленные ОАО «Брестмаш» конструкции стальной структурной оболочки покрытия в основном соответствуют ГОСТ 23118-99 и проектной документации, в частности чертежам стадии КМ [3] и КМД [4]. При изготовлении узловых элементов и в процессе монтажа узлов структурной оболочки допущены отклонения от требований проектной документации и ТКП 45-5.04-41-2006.

Установлено, что ряд элементов верхнего пояса структурной оболочки покрытия, расположенные по оси Л, имеют прорезанные на монтаже овальные отверстия для болтов с контролируемым натяжением, что недопустимо для болтовых соединений такого типа. Монтаж значительного числа узловых соединений верхнего пояса с болтами и шпильками с контролируемым натяжением выполнен с недопустимыми зазорами между деталями более 0,1 мм и 0,3 мм (рис. 2). Зазоры между деталями в узлах верхнего пояса объясняются назначением фланцев малой толщины и их деформациями при сварке. Наличие зазоров во фланцевых соединениях делает их неработоспособными и аварийноопасными. В классическом решении фланцевого соединения растягивающее усилие, прикладываемое к узлу, воспринимается главным образом вследствие преодоления сопротивления сжатию фланцев от предварительного натяжения высокопрочных болтов. В данной конструкции имеются раскрытые фланцы, поэтому усилия предварительного натяжения шпильки суммируются с растягивающими усилиями, возникающими в стержнях при приложении внешней нагрузки. Также установлено, что заполнение зазоров между деталями узлов верхнего пояса силиконом произведено не по всему периметру, что резко снижает их долговечность и несущую способность ввиду доступа влажного воздуха к незащищенным от коррозии поверхностям болтовых соединений, обработанных газопламенным способом. С части поверхностей на монтаже по оси Л не защищено заводское антикоррозийное покрытие.

На основании численного моделирования и поверочных расчетов было установлено, что узловое соединения рамок верхнего

пояса структурного покрытия на «высокопрочных шпильках» могут изгибаться и поворачиваться в двух плоскостях, а также смещаться в плоскости поверхности после преодоления сил трения. В результате, узловые соединения, при приложении расчетной нагрузки, могут привести к нарушению геометрии конструкции и соответственно к перераспределению усилий в элементах покрытия, что относится к критериям наступления предельного состояния I группы. Расчет структурной оболочки на прогрессирующее обрушение показал вероятность такого события при исчерпании несущей способности растянутых высокопрочных шпилек в наиболее нагруженных узлах верхнего пояса по оси 5'. Вследствие этого было разработано усиление узлов верхней поясной сетки структурной оболочки. Усиление было произведено по оси 5', где растягивающие усилия достигают максимальных значений (рис. 3).

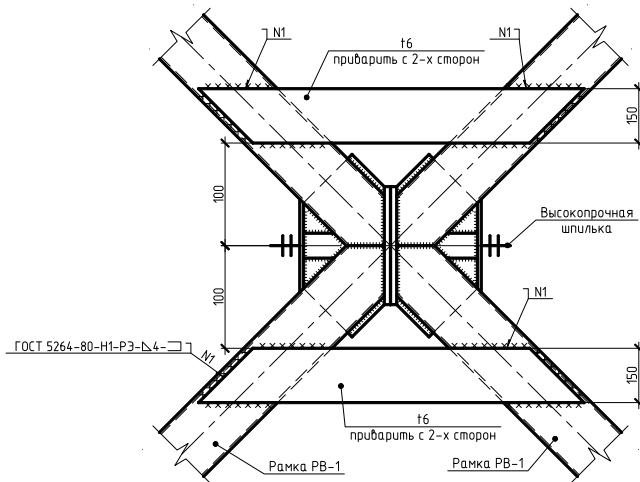


Рис. 3. Схема усиления узлов для верхней поясной сетки структурной оболочки покрытия

Натурные испытания. Испытательная нагрузка назначалась по нормативному значению постоянных и временных нагрузок, действующих на покрытие (за вычетом собственного веса оболочки и дощатого настила) и создавалась при помощи бетонных фундаментных блоков ФБС 24.5.6 (серия Б1.016.1.1 вып. 1.98) (рис. 4). Эпюра снеговой нагрузки принята по наиболее невыгодному случаю нагружения, соответствующему схеме 1 варианту 1 [1]. Блоки раскладывались на сплошном деревянном настиле толщиной 30 мм строго по схеме нагружения по специально разработанной технологической карте. Полное нормативное значение испытательной нагрузки, приведенной к равномерно распределенной по площади, составило $180,3 \text{ кН/м}^2$, что превышает нормативное значение «учитываемой» проектной нагрузки в 1,01 раза.

Для определения деформированного состояния покрытия проведено три этапа нивелирования открытой поверхности структурной оболочки: до начала нагружения, после приложения испытательной нагрузки, после полной разгрузки покрытия. Допустимость применения принятой расчетной модели для описания действительной работы структурной оболочки устанавливалась по усилиям в стержнях, определение которых производилось с помощью тензодатчиков с использованием индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 и 0,002 мм.

Результаты натурного испытания были сопоставлены с численными результатами, полученными в расчетной модели, выполненной в программном комплексе «Lira 9.2». В этой модели стержни нижней поясной сетки и раскосной решетки структурной оболочки описаны 4 типом конечного элемента с тремя степенями свободы в узле (КЭ пространственной фермы), стержни верхней поясной сетки и колонны – 10 типом конечного элемента с шестью степенями свободы в узле (универсальный пространственный стержневой КЭ).

Анализ надежности покрытия основан на сравнении величины усилия в элементе от полной испытательной нагрузки и предельно допустимого значения усилия. За предельное усилие в стержневых

элементах оболочки принято наименьшее из усилий, вычисленных исходя из условий обеспечения прочности соединений, обеспечения прочности растянутых стержней, а также с учетом исключения потери устойчивости сжатых стержней.

При снятии отсчетов по индикаторам, в части стержней экспериментальные усилия получились со знаком противоположным, полученным в расчетной модели. Объяснить это можно тем, что в действительности покрытие представляет собой тонкостенную деревянную цилиндрическую оболочку, подкрепленную стальной пространственной системой. Работа такой системы, безусловно, будет отличаться от работы чисто стержневой системы.



Рис. 4. Общий вид покрытия, нагруженного испытательной нагрузкой

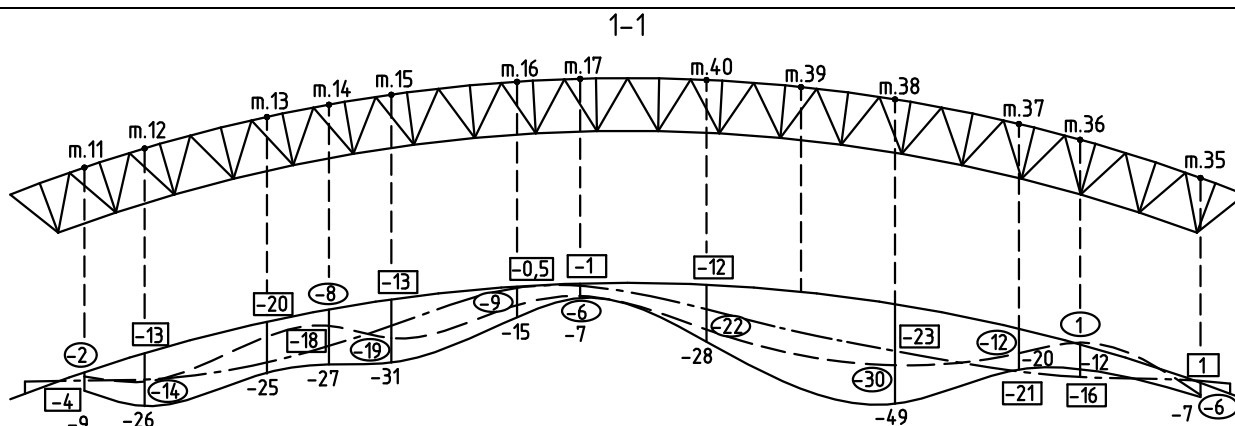
Как отмечалось выше, узлы верхней поясной сетки в расчетной схеме приняты жесткими. В то же время ряд узлов, расположенных над средними опорами, в действительности таковыми не являются. Данное утверждение основано на том, что верхний узел над опорой имеет значительное раскрытие (рис. 2). Кроме того, во время испытаний были отмечены характерные удары, свидетельствующие о сдвиге деталей, соединяемых на высокопрочных шпильках. С учетом того, что при проведении обследования были отмечены дефекты в виде овальных отверстий в ребрах, с помощью которых выполнено соединение контурных верхних поясов, вполне закономерным является утверждение, что в процессе нагружения происходило перераспределение усилий.

Вторым существенным замечанием является наличие остаточных усилий в стержнях после полной разгрузки покрытия. Присутствие таких усилий не является следствием пластических деформаций материала трубчатых элементов, а указывает на перераспределение усилий, произошедшее в системе при испытании.

При сопоставлении теоретических и экспериментальных эпюр перемещений установлено, что характер деформирования покрытия, нагруженного испытательной нагрузкой, в целом соответствует форме деформирования, полученной в расчетной модели (рис. 5). Несколько большие значения положительных вертикальных перемещений по краям оболочки вдоль длинных сторон возможны из-за раскрытия верхних узлов над средними опорами.

Значения измеренных прогибов для значительного числа «контрольных» точек заметно превышают соответствующие расчетные значения. Особенно велико расхождение для точек, расположенных ближе к центру каждого из двух свободных пролетов. Однако даже максимальные измеренные прогибы равные 45 мм и 49 мм, которые в относительных величинах пролета составляют соответственно $1/520$ и $1/661$, существенно меньше предельных значений, равных $1/285$ и $1/247$ [2].

Как отмечалось выше, после полной разгрузки покрытия во всех стержнях, где определяли усилия, отсчеты оказались несколько отличными от «нулевых». Можно предположить, что новое «исходное» напряженно-деформированное состояние системы является следствием совместной работы деревянной оболочки и конечных смещений в узлах. Возможность такой ситуации подтверждается также деформированным состоянием покрытия после его полной разгрузки, которое заметно отличается от исходного состояния.



Условные обозначения:

- 1** – расчетное значение вертикального перемещения;
- 7** – экспериментальные значения вертикального перемещения от испытательной нагрузки;
- (-6)** – значение остаточного вертикального перемещения после снятия испытательной нагрузки

Рис. 5. Вертикальные перемещения структурной оболочки, мм

Заключение

- По результатам проведенного испытания установлено, что характер деформированного состояния в целом соответствует расчетным положениям, однако фактические максимальные прогибы превышают в 2,1–2,3 раза их расчетные значения. При этом фактические максимальные значения прогибов меньше допустимых значений прогибов по [2].
- В узлах сопряжения рамок верхней поясной сетки, каждый из которых выполнен только на одной высокопрочной шпильке, при приложении нагрузки отмечена податливость, сопровождающаяся потрескиванием узлов за счет сдвига контактируемых поверхностей в процессе нагружения покрытия.
- Экспериментальные усилия в стержнях структуры удовлетворительно согласуются с расчетно-теоретическими значениями. Запас несущей способности стержней структурной конструкции на полную нормативную нагрузку достаточный и составляет 1,6–6,9, что обеспечивает восприятие стержнями структуры расчетных усилий от полной расчетной нагрузки.
- Конструкция после снятия испытательной нагрузки не возвратилась в первоначальное проектное положение и получила необратимые перемещения, составляющие до 60% от прогиба под

испытательной нагрузкой. В стержнях структуры после снятия нагрузки сохранились остаточные усилия, тензометры не возвратились в первоначальное положение. Уровень остаточных усилий при его суммировании с расчетными усилиями от внешних нагрузок не приводит к исчерпанию несущей способности стержней структуры.

- При осмотре конструкций металлической структурной оболочки в ходе испытаний и после снятия испытательной нагрузки каких-либо повреждений, искривлений и потери устойчивости элементов, разрушений узлов и деталей не обнаружено.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР. – М.: ЦНИИП, 1986. – 36 с.
- Нагрузки и воздействия. Дополнения. Разд. 10. Прогибы и перемещения: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 8 с.
- Проект 141-1.05 КМ «Ледовая арена в г. Пружаны. Корректировка Плавательный бассейн» / ОАО «Брестпроект».
- Проект 140.08-КМД «Изготовление стадиона КМД структурной плиты для плавательного бассейна в г. Пружаны» / ОАО «Брестпроект».

21.01.09

DRAGAN V.I., MUCHIN A.V., SHURYN A.B., LIUSTSIBER V.V. The results of the examination and as-built tests of a metal structural shell of the covering of the swimming pool and aqua park in Pruzhany

In this article basic results of the examination and as-built tests of a metal structural shell of the covering of the swimming pool and aqua park in Pruzhany are given. During the examination of the construction a number of production and assembly defects are registered. The assessment of the degree of the impact of these defects on the covering bearing capacity is given. The as-built tests of the covering are conducted and a real deflected mode of the covering by its full test loading and after a full unloading is defined.

624.012

..

Введение. В теории предварительно напряженных конструкций принято считать, что измерение величины втягивания каната на

торце напрягаемого элемента является непрямым (косвенным) методом оценивания длины зоны передачи напряжений. Следует от-

Тур Виктор Владимирович, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологий бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.
Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.