

УДК 303.823.23; 692.45

*КОПАНИЦА ДМИТРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
kopanitsa@mail.ru*

*МЕЛЁХИН ЕВГЕНИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
melean@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УЗЛОВ БЕСКАРКАСНЫХ ПОКРЫТИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ГНУТО-ЛИСТОВЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Представлена методика экспериментальных исследований опорных узлов бескаркасных покрытий из гнuto-листовых тонкостенных профилей с двумя вариантами расположения опорной пластины с одноболтовым срезным соединением. Обоснованы конструкции узлов с опорными пластинами, определены возможности их применения. Приведена расчётная модель конструкции бескаркасного покрытия с технической аппроксимацией конструктивных особенностей гнuto-листовых тонкостенных профилей для оценки напряжённо-деформированного состояния опорных узлов и обоснования их опытной нагрузки. Обосновано проведение двух серий эксперимента на основе использования конструкций натурных моделей опорных узлов. Изготовление натурных моделей осуществлялось с выборкой исходных фрагментов из конструкции бескаркасного покрытия полной монтажной готовности.

Ключевые слова: бескаркасные покрытия цилиндрической оболочки; гнuto-листовой тонкостенный профиль; расчётная математическая модель на основе аппроксимации конструктивных особенностей; натурная модель опорного узла серийного эксперимента; испытательный стенд.

*DMITRII G. KOPANITSA, DSc, Professor,
kopanitsa@mail.ru*

*EVGENII A. MELEKHIN, PhD, A/Professor,
melean@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

EXPERIMENTAL STUDIES OF SEMICIRCULAR SHELL JOINTS IN QUONSET HUTS

The paper presents the experimental methodology of joining cylindrical shells made of light formed sections in lightweight frameless structures. Two variants of counterplate position with a bolted connection are described, and joint structures with supporting plates are grounded, as well as opportunities of their application. The design model is presented for Quonset units with approximated structural properties to determine the stress and strain state of the structure. The rationale for two series of experiments is presented using counterplate full-scale models of joints. Quonset unit modeling is performed using sampling of its original fragments.

Keywords: quonset hut; semicircular shell; light formed section; design model; design feature approximation; counterplate full-scale model; test bench.

Введение

В настоящее время устойчивая терминология, связанная с бескаркасными покрытиями зданий криволинейного очертания, не сложилась в полной мере. Так, характерное криволинейное очертание имеют и арочные покрытия, и цилиндрические оболочки. Круговое очертание и в том и в другом случае характеризуется радиусом кривизны, равным радиусу окружности.

Каркас арочного покрытия представляет собой совокупность плоских или пространственных арок либо решётчатых и сплошностенчатых листовых ребристых складок, как правило, имеющих сегментное очертание. Основу покрытия цилиндрической оболочки составляет массив сетчатой стержневой или сплошностенчатой листовой структуры.

Таким образом, сходство рассматриваемых систем по характерным признакам – очертанию конструктивной формы, статической схеме работы, геометрии элементов и особенностям их сопряжения – позволяет рассматривать терминологию, принятую как для арочных покрытий, так и для цилиндрических оболочек. Тем не менее представленные бескаркасные покрытия по признаку распределения основных усилий, определяющих особенности напряжённо-деформированного состояния, в том числе и вследствие соотношения размеров поперечного сечения элементов к пролёту всей конструкции, ближе к цилиндрическим оболочкам.

Бескаркасные покрытия из тонкостенных гнуто-листовых профилей относятся к современным эффективным строительным конструкциям, которые применяются при строительстве зданий складов, производственных цехов, торговых, выставочных и спортивных комплексов, ангаров, гаражей. Однослойное покрытие широко используется для неотапливаемых зданий. Для отапливаемых зданий применяют двухслойное покрытие с промежуточным заполнением слоя теплоизоляции [10]. Индустриальное освоение процесса гнутья тонколистовой стали с образованием профилей с заданной конструктивной формой в сочетании с различными видами их соединения позволило значительно расширить номенклатуру данных конструкций и область их применения [2–4, 6]. Развитие научно-практических исследований является основой для повышения эффективности использования тонкостенных конструкций [1, 4].

Особенности конструкции бескаркасного покрытия цилиндрической оболочки из гнуто-листовых тонкостенных профилей

Конструкция бескаркасного покрытия формируется из массива гнуто-листовых тонкостенных профилей заданной одинаковой кривизны*.

Формование гнуто-листового профиля криволинейного очертания производится на механизированном гибочном стане в два технологических приема. Первым приемом осуществляется профилирование рулонной стали в прямолинейный профиль швеллерного типа с отгибами по кромкам для последу-

* Конструкции покрытия бескаркасных арочных зданий из стальных гнутых профилей. Технические условия 5283-147-02494680–2004.

ющего образования фальцевого узла сплавляемых профилей (рис. 1, *а*). Вторым технологическим приемом производится гофрирование стенки и полок прямолинейного профиля для формирования кривизны, соответствующей очертанию цилиндрической оболочки (рис. 1, *б*). При этом гофрирование стенки одновременно сопровождается её дуговым поперечным выгибом, ориентированным в сторону из полости гнутого профиля. Толщина рулонной стали для таких конструкций выбирается от 0,5 до 1,2 мм.

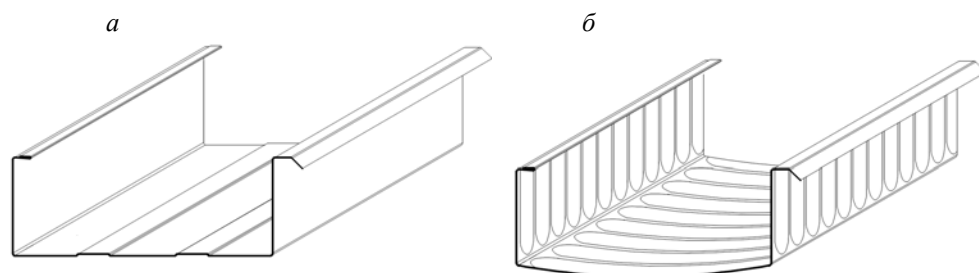


Рис. 1. Схема гнуто-листового тонкостенного профиля:
а – прямой профиль; *б* – гофрированный профиль

Сплачивание гнуто-листовых профилей производится механизированным способом с помощью фальцегибочной машины. Образование фальцевых шовных узлов осуществляется пластическим деформированием отгибов кромок гнутого профиля с обжатием [14].

Технология производства покрытий из гнутых тонкостенных профилей предусматривает укрупнительную сборку монтажными блоками из пяти-шести профилей (рис. 2).



Рис. 2. Монтажный блок из гнуто-листовых тонкостенных профилей

Выбранное количество профилей в монтажном блоке соответствует грузоподъемности автокрана, обеспечивает удобство монтажных манипуляций первичного сплачивания группы профилей с последовательной поэтажной

укладкой. Формирование сборочной единицы с достаточно устойчивой геометрией контура позволяет обеспечить точность монтажа и качественные фальцевые узлы швов сплачивания монтажных блоков.

При формировании конструкций опорных узлов необходимо учитывать особенности технологии возведения бескаркасных покрытий, которые, накладывая соответствующие условия и требования, определяют их конструктивную состоятельность.

Следует отметить, что покрытие из прямолинейного корытного профиля достаточно эффективно может применяться в различных вариантах ограждающих и несущих конструкций и в комбинированных системах [4, 12, 14].

Экспериментально-теоретические исследования проводились для покрытия пролётом 18 м. В основе конструкции рассматривался гнуто-листовой тонкостенный профиль криволинейного очертания швеллерного типа*. Исходная толщина листовой рулонной стали составляла 1,2 мм.

Рассматриваемая конструкция покрытия, как и большинство подобных бескаркасных покрытий из гнуто-листовых тонкостенных профилей, характеризуется статической схемой по подобию плоской двухшарнирной арки полукруглого очертания. Соотношение стрелы подъёма к пролёту покрытия $f/L = 0,5$. По классификации, принятой для арочных покрытий, такие конструкции относятся к высоким аркам, которые отличаются меньшими значениями усилий распора по отношению к пологим арочным конструкциям. Возможны варианты покрытий с соотношением стрелы подъёма к пролёту $0,3 < f/L < 0,5$.

Одним из характеризующих параметров формообразования гнуто-листового тонкостенного профиля криволинейного очертания является коэффициент гофрирования, отражающий меру профилирования полки гнутого профиля пластическим формованием. Гофрированием формируется кривизна гнутого профиля, которая сопровождается уменьшением первоначальной длины гнутого прямолинейного профиля за счет разницы длины наружных и внутренних дуг контура его полки. Учитывается отношение линейных размеров радиусов внутренней и наружной дуги профиля – $K_{g,R} = R_{вн}/R_{нар}$ ввиду их линейной зависимости (рис. 3).

Коэффициент гофрирования позволяет систематизировать варианты высоких и пологих арочных покрытий с различными размерами пролёта и стрелы подъема (рис. 4). Необходимо отметить, что коэффициент гофрирования с увеличением кривизны стремится к единице, что соответствует прямолинейному профилю. Изменение коэффициента гофрирования для арочных покрытий пролётом от 15 до 21 м происходит в диапазоне значений от 0,985 до 0,994.

Изготовление тонколистового гнутого профиля из полосовой стали и последующее его гофрирование путем пластического формования сопровождаются не только изменением его формы, но и толщины. Оценка влияния

* Профили стальные прокатные гнутые для конструкций покрытий бескаркасных арочных зданий. ТУ-1122-001-43841810–2009. Технические условия.

пластического формирования механического воздействия полосовой стали на её физико-механические свойства при эксплуатации в районах с неблагоприятными климатическими условиями является предметом отдельных исследований, так же как и оценка стойкости защитного оцинкованного покрытия после формирования профиля.

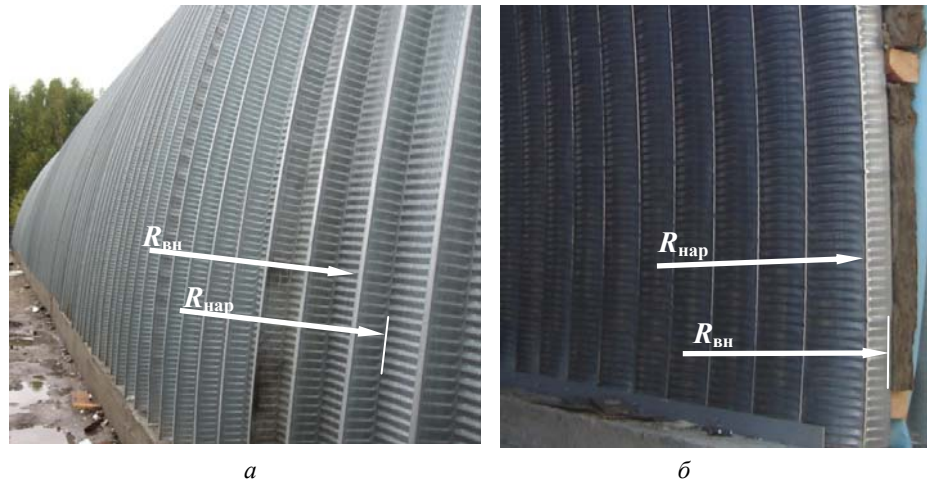


Рис. 3. Схема расположения наружных и внутренних дуг очертаания габаритов арочного покрытия:
а – вид наружной стороны покрытия; б – вид внутренней стороны покрытия

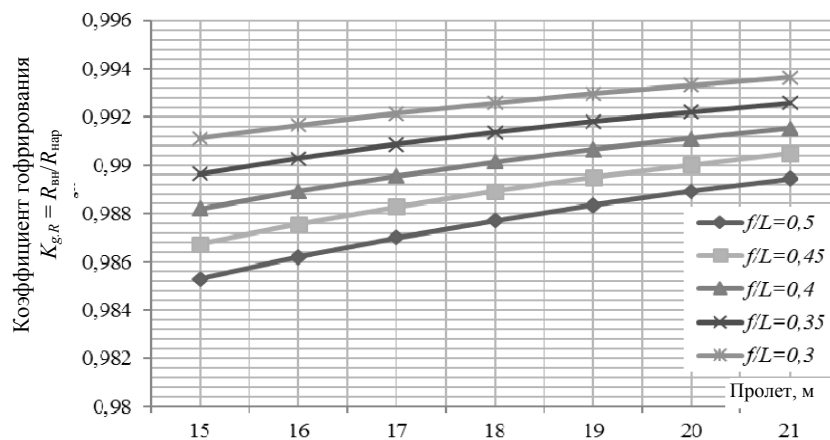


Рис. 4. Зависимость коэффициента гофрирования гнуто-листового профиля от пролёта при отношении f/L

Расчётная модель конструкции покрытия из гнутых профилей

Расчётная опытная нагрузка для загрузки натуральных моделей опорных узлов определялась по результатам анализа статического расчёта модели арочного покрытия.

В рамках планирования экспериментальных исследований конструкций опорных узлов осуществлялась оценка напряженно-деформированного состояния арочного покрытия из тонкостенных гнутых профилей пролётом 18 м. Расчётная конечно-элементная модель арочного покрытия формируется на основе аппроксимации конструктивных особенностей гнутого профиля средствами стандартного расчётного комплекса SCAD [11]. В расчётной модели соотношение габаритов длины и пролёта покрытия в плане принимается не менее единицы (рис. 5).

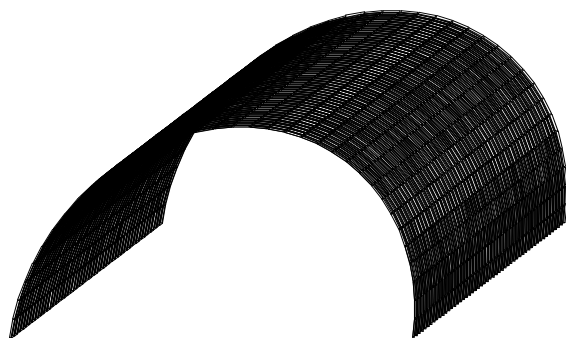


Рис. 5. Расчётная модель однослойного покрытия из гнуто-листовых профилей

Расчётная модель изначально генерируется укрупненной сеткой с габаритом $1/3$ высоты полки гнутого профиля с возможностью последующего сгущения в зонах особого внимания оценки напряженно-деформированного состояния, в том числе в местах расположения опорных узлов и возможных сосредоточенных нагрузок. При таком подходе обеспечивается достаточная точность расчета и исключается излишняя результативность в виде огромного массива данных высокой дисперсии значений [13].

Принятые габариты сетки генерации основаны на результатах анализа расчетов математических моделей покрытий при оценке характера распределения изолиний нормальных напряжений при установленном диапазоне дисперсии значений. Поэтому последующее сгущение сетки до $1/9$ высоты полки в особых зонах контроля для дальнейшей оценки их напряженно-деформированного состояния является вполне достаточным.

В расчётной схеме арочного покрытия учитываются воздействия от собственного веса, ветрового и снегового давления и их сочетания, предусмотренные современными нормами проектирования [8]. При задании граничных условий предусматриваются закрепления в местах расположения опорных узлов расчётной модели оболочки. Ограничения в опорных узлах назначаются по линейным смещениям во всех направлениях, что необходимо учитывать при конструировании опорных узлов.

Конструкции опорных узлов

Конструирование опорных узлов связано с особенностями работы арочных покрытий, передачи опорных усилий на фундамент, геометрическими характеристиками и параметрами гнуто-листовых профилей.

Разработанная конструкция опорного узла состоит из опорной пластины с отверстием под постановку одноболтового срезного соединения. Крепление опорной пластины к обвязочной балке из стального проката осуществляется односторонним угловым швом.

Для сравнительного анализа конструктивной состоятельности решения с многократной повторяемостью опорного узла с одной пластиной рассматриваются два варианта сопряжения опорных пластин с рёбрами профилей покрытия. Первый вариант предполагает установку опорной пластины между полками смежных сплавиваемых гнутых профилей (рис. 6, а). Второй вариант – пластина устанавливается внахлест к ребру, образованному полками сплавиваемых профилей (рис. 6, б).

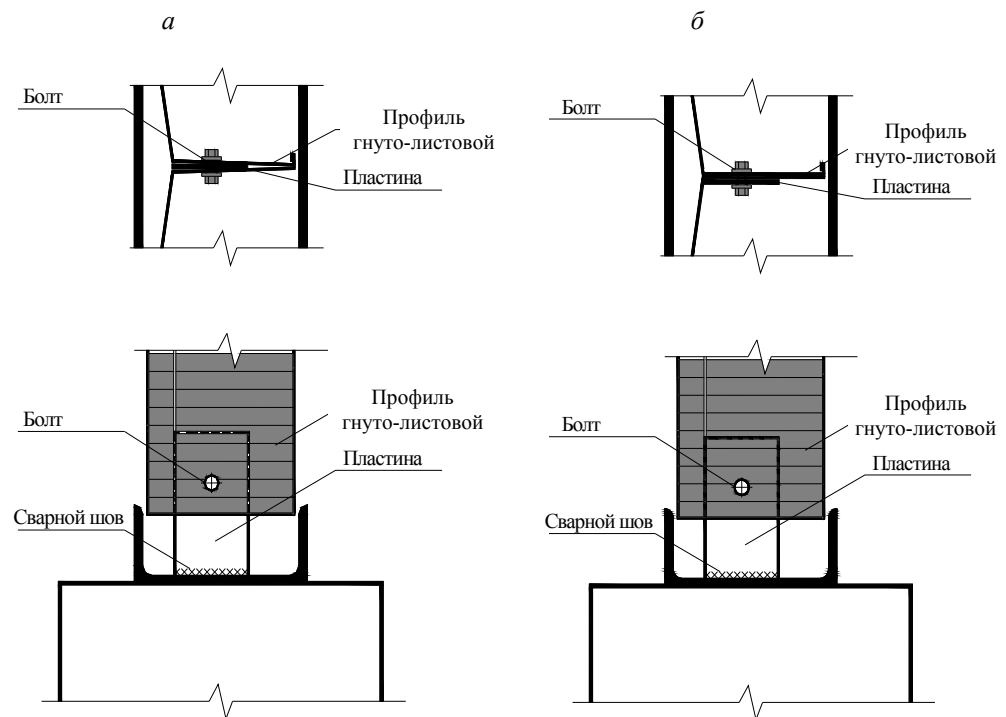


Рис. 6. Схемы конструкций опорных узлов:
 а – опорная пластина между полками гнутого профиля; б – опорная пластина внахлест к полкам гнутого профиля

Обоснование конструктивных решений опорных узлов

При разработке конструкций опорных узлов с использованием тонкостенных узловых пластин учитывались особенности технологии изготовления и возведения, эксплуатации бескаркасного арочного покрытия, результаты исследований напряженно-деформированного состояния и сравнительного анализа конструктивной состоятельности и рациональности.

Опорные узлы компонуются в местах расположения ребер, которые образованы при сплачивании полок смежных тонкостенных профилей. Доволь-

но частое расположение опорных узлов предполагает равномерное распределение опорных усилий на фундамент либо на обвязочные балки. Относительно небольшие значения опорных реакций при дискретном распределении позволяют использовать в конструкциях опорных узлов тонкостенные детали, избежать высокой концентрации напряжений и введения разгружающих элементов, а также использовать соединения, несущая способность которых определяется по критерию смятия соединяемых тонкостенных деталей.

Наличие большого количества гнуто-листовых профилей арочного покрытия предполагает соответствующее количество опорных узлов. А высокая повторяемость опорных узлов предусматривает необходимость применения конструктивных решений простого изготовления и малой металлоемкости.

Конструктивное решение опорных узлов, в которых передача опорного усилия осуществлялась бы торцевой поверхностью гнутых профилей, на практике реализовать весьма трудно ввиду сложного процесса пригонки и необходимости проведения торцевого реза высокой точности для каждого в отдельности гнутого тонкостенного профиля арочного покрытия и всех в совокупности. В условиях строительной площадки, согласно технологии производства, обеспечить высокую точность пригонки торцевой части к опорной поверхности практически не представляется возможным.

По результатам оценки конструктивной состоятельности установлено, что конструкция опорного узла на основе применения одной выводной пластины является достаточно удобным и рациональным решением. Промежуточный компоновочный элемент в виде пластины позволяет осуществлять сплачивание как тонкостенных элементов между собой срезными соединениями на болтах, так и производить соединение тонкостенных профилей с более толстостенными прокатными профилями с возможностью соответственно применения сварки. Такое конструктивное решение опорных узлов может рационально применяться не только для арочного покрытия, но и в других вариантах конструкций, выполненных из гнутых тонкостенных профилей [4, 12].

Экспериментальные исследования опорных узлов

Для изготовления экспериментальных конструкций узлов проводилась выборка натуральных фрагментов бескаркасного арочного покрытия. Фрагменты натуральных узлов выполнялись из двух частей смежных гнуто-листовых тонкостенных профилей с фальцевым шовным сплачиванием и габаритными размерами $50 \times 110 \times 200$ мм, где 50 мм – ширина фрагмента стенки гнутого профиля, 110 мм – высота полки профиля, 200 мм – высота фрагмента профиля. Крепление опорных пластин $3 \times 75 \times 110$ мм к фрагменту арочного покрытия осуществлялось посредством соединения болтом диаметром 12 мм. Формирование отверстия под постановку болта осуществлялось пакетным сверлением пластины и фрагмента профилей. Установка шайб производилась под головку и гайку болтового соединения.

Выбор конструкции опорных узлов производился из условия обеспечения максимального соответствия опытных моделей натурному исполнению [9]. Габариты опорной части фрагментов натуральных конструкций узлов из гнуто-листовых профилей назначены из условия обеспечения устойчивости

и безопасности проведения испытательных работ. Передача усилия расчетной опытной нагрузки осуществлялась между двумя частями узла – торцевыми частями фрагментов профилей и опорной пластины в предположении их работы на смятие посредством одноболтового срезного соединения.

Для решения поставленных экспериментальных задач серийная конструкция опытных моделей узлов проектировалась таким образом, чтобы несущая способность из условия смятия любой из ее сопрягаемых частей значительно превышала несущую способность одноболтового срезного соединения.

Обработка торцевых частей фрагментов профилей и опорных пластин обеспечивалась прямыми ортогональными резами, что при учете незначительной толщины элементов при прочих габаритных размерах конструкции натуральных узлов являлось вполне достаточным.

Подобная конструкция натуральных моделей обеспечивала простоту изготовления, способствовала минимизации трудозатрат и увеличению производительности серийного эксперимента [9].

Программой экспериментальных исследований предусматривалось проведение двух серий экспериментов в соответствии с количеством видов конструкций опорных узлов.

Первая серия – это натурные модели узлов с расположением опорной пластины между полками сплавиваемых гнуто-листовых профилей (рис. 7).

Вторая серия – это натурные модели узлов с расположением опорной пластины внахлест к полкам сплавиваемых гнуто-листовых профилей (рис. 8).



Рис. 7. Натурная модель опорного узла первой серии



Рис. 8. Натурная модель опорного узла второй серии

Необходимо отметить, что в рамках планирования эксперимента конструкций узлов выбор объекта исследования следует осуществлять с учетом особенностей напряженно-деформированного состояния несущей системы. Так, для проведения экспериментальных исследований несущих систем, напряженно-деформированное состояние которых характеризуется неравно-

мерностью распределения усилий и высокой дисперсией их значений, целесообразно использовать опытные натурные конструкции [5]. В этом случае может применяться простая силовая схема нагружения опытной конструкции с однонаправленным либо реверсным действием в одной плоскости [7]. Поэтому, учитывая, что устройство опорных узлов конструкций из тонкостенных гнутых профилей производится в зонах с относительно равномерным распределением напряжений и низкой дисперсией их значений, обоснованно и целесообразно проведение эксперимента опорных узлов с использованием их натуральных моделей.

Состав приборной базы для проведения эксперимента натуральных моделей узлов: испытательная машина Instron 3382, приборы для обмерных работ с различной степенью точности.

Испытательная машина Instron 3382 позволяет производить проверку образцов и конструкций при непосредственном воздействии осевого усилия, а также контролировать изменения значений основных параметров, характеризующих ход проведения эксперимента, с последующей выдачей первичной опытной информации.

Таким образом, интегрированные системы регистрации опытных данных и экспериментального нагружения позволяют исключить процесс обработки первичной информации.

До начала проведения серийного эксперимента конструкций узлов проводились стандартные испытания образцов на разрыв (рис. 9). Испытания образцов проводились также с помощью испытательной машины Instron 3382.



Рис. 9. Стандартный образец выборки испытаний на разрыв

Образцы для испытаний готовились из пластин, которые вырезались из полок гнутого тонкостенного профиля с последующей доработкой их контурных кромок.

При разработке испытательного стенда для серийного эксперимента учитывался ряд ограничений и допущений:

1. Простота устройства с сохранением соответствия конструктивных особенностей натуральных узлов и их моделей. Габаритные размеры фрагментов гнутых профилей натурной модели узла установлены из условия обеспечения равномерной передачи опытной нагрузки с учётом напряженно-деформированного состояния расчётной модели арочного покрытия. Наличие сварного шва опорной пластины не учитывается ввиду малой изгибной жесткости пластины из плоскости и включается в запас.

2. Приложение опытной нагрузки производится по осевой (вертикальной) линии. Опытная нагрузка прикладывается в виде сжимающего усилия по торцу опорной пластины и торцевой поверхности профиля натурального образца. Принятая форма нагружения натуральных моделей узлов по направлению их вертикальной оси позволяет довольно просто осуществить приложение опытной нагрузки. Выбранная форма приложения опытной нагрузки принята в предположении компенсации одноболтовым соединением равнодействующего усилия опорной и распорной реакций.

3. Выбор толщины опорных пластин обусловлен стремлением к снижению металлоёмкости по критерию компоновочных возможностей геометрии конструктивного исполнения узлов и критерию их жесткости.

4. Толщины опорных пластин первой и второй серии натуральных моделей узлов приняты одинаковыми для сравнительного анализа результатов.

5. Установка болтового соединения произведена в плоскости, образованной линиями центров тяжести сечений сплавляемых гнутых профилей.

Экспериментальное нагружение натуральных моделей узлов производилось с минимальной постоянной скоростью 4 мм/мин. Натурные модели узлов центрировались по оси опорной пластины относительно оси сжимающего усилия. Серийные испытания натуральных моделей проводились до полного исчерпания несущей способности образца, оцениваемой по двум критериям – потеря устойчивости опорной тонкостенной пластины и смятие контактных зон одноболтового срезного соединения.

Заключение

По представленной методике проведены экспериментальные исследования натуральных узлов конструкций бескаркасных покрытий из гнутолистовых тонкостенных профилей. Определены физико-механические свойства материала гнутого профиля в зоне расположения болтового соединения. Представлены основные положения анализа конструктивной состоятельности разработанных решений опорных узлов. Систематизированы результаты оценки напряженно-деформированного состояния расчётной модели арочного покрытия. Обоснованы значения опытной нагрузки и формы её приложения с учётом конструктивных особенностей натуральных моделей опорных узлов с двумя вариантами расположения опорной пластины с одноболтовым срезным соединением. Разработан испытательный стенд на проведение серийного эксперимента, что определяет широкие возможности для проведения экспе-

риментальной оценки других вариантов конструкций опорных узлов из тонкостенных профилей с использованием различных видов срезных соединений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Adany, S.* Buckling mode classification of members with open thin-walled cross-section by using Finite Strip Method. Research Report / S. Adany // Johns Hopkins University, 2004. – 99 p.
2. *Прицкер, А.Я.* Бескаркасные складчатые конструкции / А.Я. Прицкер, В.А. Аденский, М.С. Фридман. – К. : Будивельник, 1991. – 88 с.
3. *Брудка, Я.* Стальные складчатые конструкции в строительстве / Я. Брудка, Р. Гарнцарек, К. Милачевски ; пер. Л.Б. Шарина. – К. : Будивельник, 1989. – 152 с.
4. *Ограждающие и несущие строительные конструкции из стальных тонкостенных профилей: монография* / Л.В. Енджиевский, И.И. Крылов, А.Н. Кретинин, А.В. Терешкова. – Красноярск : Сибирский федеральный университет. – 2010. – 282 с.
5. *Мелёхин, Е.А.* Работа узлов бесфасоночного складчатого покрытия с поясами пятигранного составного профиля : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Томск, 2003. – 151 с.
6. *Тришевский, И.С.* Металлические облегченные конструкции (справочное пособие) / И.С. Тришевский, В.В. Клепанда. – Киев : Будивельник, 1978. – 112 с.
7. *Ерохин, К.А.* Методика экспериментального исследования узлов складчатого покрытия из прокатных профилей / К.А. Ерохин, Е.А. Мелёхин, А.Н. Купряхин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2000. – № 2. – С. 123–126.
8. *Нагрузки и воздействия на здания и сооружения* / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин ; под общей редакцией А.В. Перельмутера. – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 482 с.
9. *Надежность и эффективность в технике.* Справочник: в 10 т. – М. : Машиностроение, 1989. Т. 6. Экспериментальная отработка и испытания / под общ. ред. Р.С. Судакова, О.И. Тескина. – 376 с.
10. *Мелёхин Е.А.* Особенности конструкции и расчёта двухслойных пространственных арочных покрытий из гнуто-листовых тонкостенных профилей / Е.А. Мелёхин // Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Сб. статей XI Международной научно-технической конференции. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2011. – С. 87–89.
11. *Перельмутер, А.В.* Расчётные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Киев : Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с.
12. *Копаница, Д.Г.* Пространственно-стержневые комбинированные системы двускатных покрытий зданий / Д.Г. Копаница, Е.А. Мелёхин // Вестник строительства и архитектуры. Сб. статей VII Международной научно-практической конференции «Строительство и архитектура XXI века: перспективы развития и инновации». – г. Орел. – 2010. – С. 108–112.
13. *Рикардс, Р.Б.* Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин / Р.Б. Рикардс. – Рига : Зинатне, 1988. – 284 с.
14. *Айрумян, Э.Л.* Эффективные холодногнутые профили из оцинкованной стали – в массовое строительство / Э.Л. Айрумян, В.Ф. Беляев // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – № 11. – С. 10–17.

REFERENCES

1. *Adany S.* Buckling mode classification of members with open thin-walled cross-section by using Finite Strip Method. Research Report. Johns Hopkins University, 2004. 99 p.
2. *Pritsker A.Ya., Adenskii V.A., Fridman M.S.* Beskarkasnye skladchatye konstruktсии [Folded-plate constructions]. Kiev : Budivel'nik Publ., 1991. 88 p. (rus)
3. *Brudka J. Garnisarek R., Milacewski K.* Stal'nye skladchatye konstruktсии v stroitel'stve [Steel folded-plate constructions]. Kiev : Budivel'nik Publ., 1989. 152 p. (transl. from Pol.)

4. *Endzhiievskii L.V., Krylov I.I., Kretinin A.N., Tereshkova A.V.* Ograzhdayushchie i nesushchie stroitel'nye konstruksii iz stal'nykh tonkostennykh profilei: monografiya [Wall and load-bearing strictures]. Krasnoyarsk : Siberian Federal University Publ., 2010. 282 p. (rus)
5. *Melekhin E.A.* Rabota uzlov besfasonochnogo skladchatogo pokrytiya s poyasami pyatigrannogo sostavnogo profilya : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [The behavior of folded-plate construction with five-sided composed profiles]. Tomsk, 2003. 151 p. (rus)
6. *Trishevskii I.S., Klepanda V.V.* Metallicheskie oblegchennye konstruksii (spravochnoe posobie) [Metal lightweight structures]. Kiev : Budivel'nik, 1978. 112 p. (rus)
7. *Erokhin K.A., Melekhin E.A., Kupryakhin A.N.* Metodika eksperimental'nogo issledovaniya uzlov skladchatogo pokrytiya iz prokatnykh profilei [Experimental technique of rolled section folded-plate construction joints]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2000. No. 2. Pp. 123–126. (rus)
8. *Gordeev V.N., Lantukh-Lyashchenko A.I., Pashinskii V.A., Perel'muter A.V., Pichugin S.F.* Nagruzki i vozdeistviya na zdaniya i sooruzheniya [Loads on building constructions]. Moscow : Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2007. 482 p. (rus)
9. *Sudakov R.S., Teskin O.I.* Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike. Spravochnik: v 10 t [Reliability and efficiency in engineering. In 10 vol.]. Moscow : Mashinostroenie Publ., Eksperimental'naya otrabotka i ispytaniya, 1989. V. 6. 376 p. (rus)
10. *Melekhin E.A.* Osobennosti konstruksii i rascheta dvukhsloinykh prostranstvennykh arochnykh pokrytii iz gnuto-listovykh tonkostennykh profilei [Design principles of two-layer arch coverings in quonset huts]. Effektivnye stroitel'nye konstruksii: teoriya i praktika. Sb. statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Penza : Privolzhskii Dom znanii, 2011. Pp. 87–89. (rus)
11. *Perel'muter A.V., Slivker V.I.* Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost' ikh analiza [Structural design models and analysis]. Kiev : Stal' Publ., 2002. 600 p. (rus)
12. *Kopanitsa, D.G., Melekhin E.A.* Prostranstvenno-sterzhnevye kombinirovannye sistemy dvuskatnykh pokrytii zdanii [Bar composite systems for two-pitch roofing]. *Coll. Articles 7th Int. Sci. Conf. 'Construction and Architecture of 21st Century: Prospects and Innovations'*. Orel. 2010. Pp. 108–112. (rus)
13. *Rikards R.B.* Metod konechnykh elementov v teorii obolochek i plastin [Finite element method in the theory of shells and plates]. Riga : Zinatne, 1988. 284 p. (rus)
14. *Airumyan, E.L. Belyaev V.F.* Effektivnye kholodnognutye profili iz otsinkovannoi stali – v massovoe stroitel'stvo [Galvanized steel sections in mass housing construction]. *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve*. 2005. No. 11. Pp. 10–17. (rus)