

УДК 624.078.4

Бобырева В. А. (Россия, г. Рязань, Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета)

Bobyreva V. A. (Russia, Ryazan, Ryazan Institute (branch) Moscow Polytechnic University)

УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕТЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВАРНОГО И ШАРНИРНОГО СОЕДИНЕНИЙ

NODAL JOINTS OF METAL MESH SHELLS: COMPARATIVE ANALYSIS OF WELDED AND HINGED JOINTS

***Аннотация:** проведен сравнительный анализ сварного и шарнирного узлов металлической сетчатой оболочки. Рассмотрены достоинства и недостатки двух этих систем.*

***Annotation:** a comparative analysis of the welded and hinged assemblies of a metal mesh shell is carried out. The advantages and disadvantages of these two systems are considered.*

***Ключевые слова:** оболочка, узловые соединения, прочность, сварка, конструкция*
***Key words:** shell, nodal joints, strength, welding, construction*

Введение

Металлические сетчатые оболочки занимают важное место в современной архитектуре и строительстве благодаря своим уникальным свойствам: высокой прочности, легкости, эстетической привлекательности и возможности создания сложных геометрических форм. Такие конструкции широко применяются при строительстве стадионов, выставочных павильонов, аэропортов, мостов и других объектов, где требуется сочетание функциональности и визуальной выразительности.

Несмотря на внешнюю легкость сетчатых оболочек, их изготовление остается дорогостоящим и трудоемким, что сдерживает их более широкое применение. Главная проблема сетчатых оболочек — узлы соединения перекрещивающихся стержней. Как правило, изготовление специальных узлов соединения требует заводской точности, что удорожает их производство [1].

В настоящее время наиболее распространенными являются два типа узловых соединений: сварное трубчатое и система МЕРО. Каждый из этих подходов имеет свои конструктивные особенности, преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при проектировании и строительстве.

Наиболее распространенными видами соединений металлических строительных конструкций являются сварные. Сварка упрощает конструктивную форму соединения, дает экономию металла, позволяет применять высокопроизводительные механизированные способы, что значительно уменьшает трудоемкость технологии.

Однако, такой тип соединения требует высокой точности изготовления, квалифицированного труда и значительных затрат на монтаж. В свою очередь,

система MERO, основанная на использовании сферических узлов и трубчатых стержней, отличается относительно малой трудоемкостью и простотой технологии выполнения. Данная система не требует монтажников высокой квалификации, но уступает сварным соединениям по прочностным характеристикам.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью выбора оптимального типа узлового соединения для конкретных условий эксплуатации и проектных требований, а также широким применением в современном мире.

Цель исследования – выявить конструктивные преимущества, недостатки и области оптимального применения каждого из рассматриваемых типов соединений, провести их комплексное сравнение с учетом конструктивных, технологических, прочностных и экономических аспектов.

В работе рассмотрены конструктивные особенности каждого типа соединения, технологические и экологические аспекты изготовления и монтажа, прочностные характеристики, а также экономическая эффективность каждого из подходов. Выводы исследования позволяют определить оптимальные решения при проектировании сетчатых оболочек в зависимости от условий эксплуатации и нагрузок.

1) Конструктивные особенности узловых соединений

Узловые соединения являются ключевыми элементами металлических сетчатых оболочек, определяющими их несущую способность, устойчивость к нагрузкам и общую надежность конструкции.

1.1) Сварное трубчатое соединение

Сварное соединение представляет собой узел, при котором трубчатые элементы соединяются с помощью сварки. Основные конструктивные особенности данного типа соединения включают:

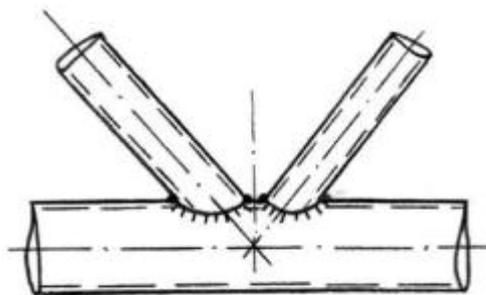


Рис. 1. Узловое сварное трубчатое соединение

Монолитность конструкции:

Сварное соединение обеспечивает высокую прочность и жесткость, что делает его идеальным для объектов с высокими нагрузками. Отсутствие разъемных элементов исключает возможность ослабления соединения со временем.

Требовательность к точности изготовления:

Для обеспечения качественного соединения требуется высокая точность изготовления труб. Допуски на размеры обычно составляют $\pm 1-2$ мм, что

требует использования высокоточного оборудования.

Примеры применения:

Сварные соединения широко используются в мостах, промышленных объектах, где требуется высокая прочность и долговечность [4].

1.2) Система MERO

Узел системы MERO состоит из литого сферического, полусферического, либо многогранного элемента-коннектора с высверленными в нем отверстиями для болтов. Основные конструктивные особенности данной системы включают:

Сферические узлы:

Узлы представляют собой сферические элементы с отверстиями для крепления трубчатых стержней. Диаметр сферических узлов обычно составляет 100-500 мм, что позволяет соединять до 20 стержней в одном узле.

Трубчатые стержни:

Стержни изготавливаются из стальных труб с диаметром **20-150 мм** и толщиной стенки **2-10 мм**. Концы стержней имеют резьбу или специальные наконечники для крепления к сферическим узлам.

Болтовые соединения:

Соединение стержней с узлами осуществляется с помощью болтов, что обеспечивает простоту сборки и демонтажа. Болты обычно имеют класс прочности 8.8 или 10.9, что обеспечивает достаточную надежность соединения.

Универсальность и модульность:

Система MERO позволяет создавать конструкции различной формы и сложности благодаря стандартизированным элементам. Стержни обладают высокой компенсационной способностью, что облегчает сборку и демонтаж, что особенно важно для временных сооружений.

Примеры применения:

Система MERO широко используется в выставочных павильонах, спортивных сооружениях и других объектах, где важны скорость монтажа и экономическая эффективность [2].

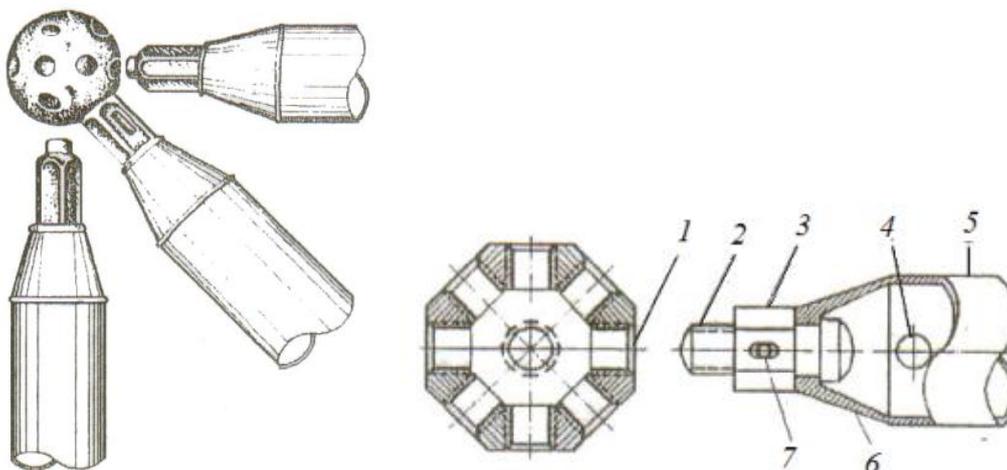


Рис. 2. Узловое соединение «Меро» и его модификации: общий вид узла, узловой элемент и детали стержня системы «Меро»;

1 – отверстие с внутренней резьбой; 2 – болт; 3 – поводковая гайка; 4 – монтажное отверстие; 5 – труба; 6 – оголовок трубы; 7 – ведущий палец

2) Технологические аспекты изготовления и монтажа узловых соединений

Технологические аспекты играют ключевую роль при выборе типа узлового соединения для металлических сетчатых оболочек. Они включают процессы изготовления, монтажа, контроля качества и эксплуатации.

2.1) Сварное трубчатое соединение

Изготовление элементов:

Трубчатые элементы изготавливаются из стальных труб с использованием высокоточного оборудования. Требования к точности изготовления: допуски на размеры составляют $\pm 1-2$ мм.

Процесс сварки:

Для соединения элементов применяется электродуговая сварка. Также ограниченно может применяться контактная сварка, газовая, газопрессовая, сварка трением, холодная, ультразвуковая.

Для обеспечения качества сварных швов требуется высокая квалификация сварщиков (не ниже 3-4 разряда). Контроль качества сварных соединений включает визуальный осмотр, ультразвуковой и рентгенографический контроль.

Монтаж:

Монтаж сварных соединений включает в себя сборку соединяемых элементов металлоконструкций и их сварку. Для сборки используют болты, различные сборочные приспособления. Процесс происходит в два этапа: сначала элементы временно закрепляют болтами, а затем подгоняют под сварку.

Ограничения:

Сложность транспортировки крупногабаритных сварных конструкций. Высокие требования к условиям монтажа (например, необходимость защиты от ветра и осадков при сварке на открытом воздухе) [6].

2.2) Система MERO

Изготовление элементов:

Сферические узлы изготавливаются методом литья или механической обработки. Трубчатые стержни производятся из стальных труб с использованием стандартного оборудования. Требования к точности изготовления: допуски на размеры составляют $\pm 3-5$ мм.

Процесс сборки:

Сборка выполняется с помощью болтовых соединений, что не требует специального оборудования. Для монтажа достаточно стандартного набора инструментов (гаечные ключи, шуруповерты). Контроль качества включает проверку затяжки болтов и визуальный осмотр соединений.

Монтаж:

Монтаж системы MERO отличается простотой и высокой скоростью. Элементы конструкции легко транспортируются и собираются на месте. Примерное время монтажа одного узла: 1-2 часа.

Преимущества:

Возможность быстрой сборки и демонтажа конструкции. Минимальные требования к квалификации персонала. Легкость транспортировки и хранения элементов [7].

3) Прочностные характеристики узловых соединений

Прочностные характеристики узловых соединений являются одним из ключевых факторов, определяющих надежность и долговечность металлических сетчатых оболочек.

3.1) Сварное трубчатое соединение

Несущая способность:

Сварное соединение обеспечивает высокую прочность благодаря монолитности конструкции.

Предельная нагрузка на соединение может достигать 500 кН (в зависимости от толщины стенки трубы и качества сварки).

Пример: для трубы диаметром 100 мм с толщиной стенки 5 мм предельная нагрузка составляет 350-400 кН.

Допустимые напряжения:

Допустимое напряжение на растяжение: 250-350 МПа.

Допустимое напряжение на сжатие: 200-300 МПа.

Эти значения зависят от марки стали и качества сварных швов.

Устойчивость к динамическим нагрузкам:

Сварные соединения демонстрируют высокую устойчивость к вибрациям и ударным нагрузкам.

Коэффициент динамической устойчивости: 1,2-1,5.

Долговечность:

При правильной эксплуатации сварные соединения могут служить 50 лет и более без потери прочности. Основные факторы, влияющие на долговечность: коррозионная стойкость и качество сварных швов.

3.2) Система MERO

Несущая способность:

Система MERO обеспечивает достаточную прочность для большинства стандартных конструкций, но уступает сварным соединениям.

Предельная нагрузка на соединение: до 300 кН (в зависимости от диаметра сферического узла и типа болтов).

Пример: для узла диаметром 200 мм с болтами класса прочности 10.9 предельная нагрузка составляет 250-300 кН.

Допустимые напряжения:

Допустимое напряжение на растяжение: 200-250 МПа.

Допустимое напряжение на сжатие: 150-200 МПа.

Эти значения зависят от материала узлов и стержней.

Устойчивость к динамическим нагрузкам:

Система MERO менее устойчива к вибрациям и ударным нагрузкам по сравнению с сварными соединениями.

Коэффициент динамической устойчивости: 1,0-1,2.

Долговечность:

Срок службы системы MERO составляет 20-30 лет при условии

регулярного обслуживания. Основные факторы, влияющие на долговечность: коррозия болтовых соединений и износ сферических узлов.

4) Экономическая эффективность узловых соединений

Экономическая эффективность является важным критерием при выборе типа узлового соединения для металлических сетчатых оболочек. Она включает затраты на изготовление, монтаж, эксплуатацию и возможный демонтаж конструкции.

4.1) Сварное трубчатое соединение

Затраты на изготовление:

Высокая стоимость изготовления обусловлена необходимостью использования высокоточного оборудования и квалифицированного труда. Стоимость изготовления: от 45000 до 100000 рублей за тонну (в зависимости от сложности конструкции и марки стали).

Затраты на монтаж:

Монтаж сварных соединений требует использования тяжелого оборудования (кранов, сварочных аппаратов) и квалифицированных сварщиков.

Затраты на монтаж: от 20000 до 40000 рублей за тонну.

Время монтажа: 4-8 часов на один узел.

Эксплуатационные затраты:

Низкие затраты на обслуживание благодаря высокой долговечности сварных соединений. Периодический осмотр и антикоррозионная обработка: 4500-10000 рублей в год на тонну.

Демонтаж и утилизация:

Демонтаж сварных соединений сложен и требует значительных затрат. Стоимость демонтажа: 10000-20000 рублей за тонну.

Утилизация металлических отходов: 5000-10000 рублей за тонну.

4.2) Система MERO

Затраты на изготовление:

Более низкая стоимость изготовления благодаря серийному производству стандартизированных элементов. Стоимость изготовления: от 30000 до 60000 рублей за тонну.

Пример: изготовление сферических узлов и трубчатых стержней обходится дешевле, чем производство фасонных элементов.

Затраты на монтаж:

Монтаж системы MERO выполняется быстро и не требует специального оборудования.

Затраты на монтаж: от 10000 до 20000 рублей за тонну.

Время монтажа: 1-2 часа на один узел.

Эксплуатационные затраты:

Умеренные затраты на обслуживание, включая регулярную проверку болтовых соединений. Периодический осмотр и замена болтов: 3000-8000 рублей в год на тонну.

Демонтаж и повторное использование:

Демонтаж системы MERO выполняется быстро и с минимальными

затратами. Стоимость демонтажа: 5000-10000 рублей за тонну.

Возможность повторного использования элементов: экономия до 40-50% при повторном монтаже.

5) Экологические аспекты применения узловых соединений

Экологические аспекты играют все более важную роль при выборе строительных технологий и материалов.

5.1) Сварное трубчатое соединение

Энергозатраты:

Процесс сварки требует значительного расхода электроэнергии.

Средний расход электроэнергии: 5-10 кВт·ч на 1 метр шва.

Пример: для сварки одного узла диаметром 100 мм требуется 20-30 кВт·ч.

Объем отходов:

При изготовлении трубчатых деталей образуются отходы металла.

Объем отходов: до 10% от массы конструкции.

Пример: для конструкции массой 10 тонн объем отходов составляет 1 тонну.

Возможность повторного использования:

Сварные соединения сложно демонтировать без повреждения элементов. Повторное использование материалов ограничено: только 10-20% элементов могут быть использованы повторно.

Экологический след:

Высокий уровень выбросов CO₂ при производстве и сварке.

Пример: выбросы CO₂ при сварке одного узла: 50-100 кг.

5.2) Система MERO

Энергозатраты:

Производство стандартизированных элементов требует меньше энергии по сравнению с сваркой.

Средний расход электроэнергии: 2-4 кВт·ч на 1 тонну элементов.

Пример: для изготовления узла диаметром 200 мм требуется 5-10 кВт·ч.

Объем отходов:

Модульная конструкция позволяет минимизировать отходы при производстве и монтаже.

Объем отходов: до 5% от массы конструкции.

Пример: для конструкции массой 10 тонн объем отходов - 0,5 тонны.

Возможность повторного использования:

Элементы системы MERO могут быть легко демонтированы и использованы повторно. Повторное использование материалов: до 80-90% элементов.

Экологический след:

Более низкий уровень выбросов CO₂ благодаря энергоэффективному производству и возможности повторного использования.

Пример: выбросы CO₂ при изготовлении одного узла: 20-40 кг.

Сравнение основных характеристик двух узловых соединений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики узловых соединений

| Параметр | Сварное соединение | Система MERO |
|---------------------------------------|---|--|
| <i>Конструктивные особенности</i> | | |
| Тип соединения | Монолитное(сварное) | Разъемное (болтовое) |
| Основные элементы | Трубы | Сферические узлы, трубы |
| Требования к точности | Высокие ($\pm 1-2$ мм) | Средние ($\pm 3-5$ мм) |
| Максимальное число элементов в узле | Ограничено сложностью сварных соединений | До 20 стержней в одном узле |
| Применение | Мосты, промышленные сооружения | Выставочные павильоны, временные конструкции |
| <i>Технологические аспекты</i> | | |
| Требования к оборудованию | Высокие (сварочные аппараты, краны) | Низкие (стандартные инструменты) |
| Требования к квалификации персонала | Высокие (квалифицированные сварщики) | Низкие (обучение не требуется) |
| Время монтажа узла | 4-8 часов | 1-2 часа |
| Контроль качества | Визуальный осмотр, ультразвуковая дефектоскопия, рентгенография | Визуальный осмотр, проверка затяжки болтов |
| Транспортировка | Сложная (крупногабаритные элементы) | Легкая (модульные элементы) |
| <i>Прочностные характеристики</i> | | |
| Предельная нагрузка на соединение | До 500 кН | До 300 кН |
| Допустимое напряжение на растяжение | 250-350 МПа | 200-250 МПа |
| Допустимое напряжение на сжатие | 200-300 МПа | 150-200 МПа |
| Коэффициент динамической устойчивости | 1,2-1,5 | 1,0-1,2 |
| Срок службы | 50 лет и более | 20-30 лет |
| <i>Экономическая эффективность</i> | | |
| Стоимость изготовления | 45000-100000 рублей за тонну | 30000-60000 рублей за тонну |
| Затраты на монтаж | 20000-40000 рублей за тонну | 10000-20000 рублей за тонну |
| Время монтажа узла | 4-8 часов | 1-2 часа |
| Эксплуатационные затраты | 5000-10000 рублей в год на тонну | 3000-8000 рублей в год на тонну |
| Стоимость демонтажа | 10000-20000 рублей за тонну | 5000-10000 рублей за тонну |
| <i>Экологические аспекты</i> | | |
| Энергозатраты на производство | 5-10 кВт·ч на 1 метр шва | 2-4 кВт·ч на 1 тонну элементов |
| Объем отходов | До 10% от массы конструкции | До 5% от массы конструкции |
| Возможность повторного использования | 10-20% | 80-90% |
| Выбросы CO ₂ | 50-100 кг на один узел | 20-40 кг на один узел |

Таким образом, можно сделать вывод, что оба типа узловых соединений имеют свои преимущества и недостатки. Сварное соединение обеспечивает более высокую прочность и долговечность, но требует значительных затрат на изготовление и монтаж. Система MERO, напротив, отличается экономичностью и простотой сборки, но уступает по прочностным характеристикам. Выбор между этими типами соединений должен основываться на конкретных требованиях проекта, включая нагрузочные характеристики, срок службы, бюджет и условия эксплуатации.

4. Заключение

Металлические сетчатые оболочки широко применяются в современной архитектуре и инженерном строительстве благодаря своей эстетической выразительности, малой массе и высоким конструктивным возможностям. В таких конструкциях критически важным элементом являются узловые соединения, обеспечивающие передачу нагрузок между отдельными стержневыми элементами оболочки. От качества и особенностей этих соединений напрямую зависит надёжность, долговечность и экономичность всей конструкции [3]. В данной работе рассматривались два подхода к организации узловых соединений:

Сварное трубчатое соединение, которое предполагает изготовление узлов с применением современных сварочных технологий.

Система MERO, представляющая собой узловое решение, отличающееся использованием специализированных соединительных элементов, часто имеющих форму полушария или двухполушарного узла с болтовым креплением, что обеспечивает модульность и ускорение монтажных работ.

Проведенный сравнительный анализ показал, что оба типа узловых соединений имеют преимущества и недостатки. Сварное трубчатое соединение характеризуется высокой прочностью и жёсткостью, что делает его оптимальным решением для конструкций с высокими нагрузками и требовательными условиями эксплуатации. Однако высокая точность изготовления и контроль сварных швов ведут к увеличению затрат. Система MERO предлагает модульный подход с быстрым монтажом и снижением массы узлов, что особенно актуально при массовом строительстве и необходимости быстрой сборки. При этом механическая эффективность MERO может быть ниже, чем у сварных узлов, особенно при экстремальных нагрузках.

Выбор оптимального типа узлового соединения должен базироваться на анализе условий эксплуатации, требований к прочности, технологическим возможностям производства и экономическим параметрам проекта.

Библиографический список

1. В. В. Леденев, А. В. Худяков. Оболочечные конструкции в строительстве теория, проектирование, конструкции, примеры расчета. - Тамбов Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ» 2016.
2. В.В. Михайлов, М.С. Сергеев. Пространственные стержневые Конструкции покрытий (структуры). Учебное пособие. – Владимир, 2011.
3. Петров В.С. Современные методы проектирования сетчатых оболочек. – СПб.:

Перспектив, 2020.

4. Расчет и проектирование сварных соединений - Тамбов Издательский центр
ФГБОУ ВО «ТГТУ» 2024

5. MERO System: Technical Manual. – MERO-TSK International, 2019.

6. ГОСТ Р 58121-2018. «Конструкции стальные строительные. Общие технические
условия.»

7. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Нормы проектирования».