

УДК 624.074

Решение задачи оптимального проектирования пространственно-стержневых конструкций с использованием нового конструктивного монтажного элемента

В. Ю. АЛПАТОВ, канд. техн. наук, зам. первого проректора, доцент кафедры «Металлические и деревянные конструкции» (СГАСУ)

А. М. МУШКАТ, инж. (ОАО «Самаранефтехимпроект»)

Пространственные решетчатые конструкции обладают особенностью, отличающей их от других классов конструкций, — это многообразие возможных геометрических форм [1–3]. Отмеченное многообразие позволяет проектировщикам применять различные приемы сборки пространственно-стержневых конструкций, которые во многом зависят от ее разбивки на сборочные (отправочные) марки. Отправочная марка, наряду с другими параметрами, определяет экономическую эффективность конструкции. От ее формы, размеров, весовых характеристик и других особенностей зависит стоимость изготовления, перевозки, укрупнительной сборки, монтажа конструкции. Рациональная разбивка большепролетной конструкции на отправочные марки — сложная и интересная инженерная задача, успешно ее решение возможно с использованием принципов оптимального проектирования.

Анализ опыта проектирования и изготовления пространственных стержневых конструкций [4] показывает, что их формирование чаще всего выполняется из следующих элементов:

- отдельных линейных стержневых элементов и узлов;
- небольших плоских ферм длиной, равной размеру одной панели конструкции;
- плоских длинноразмерных ферм, устанавливаемых наклонно и объединяемых между собой с помощью дорборных элементов;
- ферм, устанавливаемых под углом и образующих пояса и часть решетки конструкции. Недостающие участки поясов и решетки заполняют мелкоразмерными дорборными элементами;
- ферм, устанавливаемых под углом одна к другой и образующих решетчатую складку; поясов ортогонального направления, комплектуемых длинноразмерными линейными элементами;
- плоских длинноразмерных горизонтально устанавливаемых ферм, образующих поясные сетки. Решетка комплектуется из мелкоразмерных дорборных стержневых элементов;
- отдельных пирамид с треугольным, квадратным и реже шестиугольным основанием. Дорборными элементами в этом случае могут служить линейные элементы, а также плоские стержневые треугольники заводского изготовления;
- длинноразмерных пространственных ферм V-образ-



В. Ю. АЛПАТОВ

ного, треугольного или трапециевидного сечения, объединяемых в структурные блоки дорборными элементами.

Каждый из приемов членения большепролетных пространственных стержневых конструкций на отправочные марки имеет свои достоинства и недостатки.

При членении структур на мелкие отправочные марки небольшой массы, например, рационально используются транспортные средства, возможен монтаж методом наращивания без применения строительных кранов большой грузоподъемности. При этом возрастает число узловых сопряжений.

Другой пример — стремление увеличить размеры отправочной марки. Это делается, как правило, с целью повышения точности сборки, упрощения и ускорения монтажа. Цель достигается за счет повышения степени заводской готовности конструкции. Но следует понимать, что укрупнение отправочных марок ведет к потерям эффективности конструкции из-за нерационального использования транспортных средств.

Рассмотренные в качестве примеров ситуации наглядно демонстрируют тот факт, что проблема определения рациональных размеров отправочных марок конструкций носит противоречивый, двойственный характер. Стремясь достигнуть компромисса между высокой заводской готовностью и рациональным использованием транспортных средств, авторы статьи предложили конструкцию новой трансформирующейся отправочной марки для пространственно-стержневых конструкций.

Авторами была поставлена цель — разработка нового монтажного элемента, при транспортировке которого можно эффективно использовать грузоподъемность транспортного средства и, таким образом, снизить затраты на перевозку элемента при сохранении его высокой заводской готовности.

Поставленная цель достигнута за счет применения монтажного элемента полной заводской готовности с возможностями трансформации, позволяющими уменьшить его размеры при перевозке. Предлагаемая отправочная марка (далее — монтажный элемент), состоит из узлового элемента и нескольких стержневых элементов, прикрепляемых к нему шарнирно на болтах. Узловой элемент представляет собой сварную деталь из листовых фасоннок, напоминающую собой крыльчатку. Сварка такого элемента возможна различными способами, однако авторы статьи считают наиболее рациональным использова-



Рис. 1. Принципиальная схема трансформирующейся отправочной марки в проектном (а) и транспортировочном (б) положениях

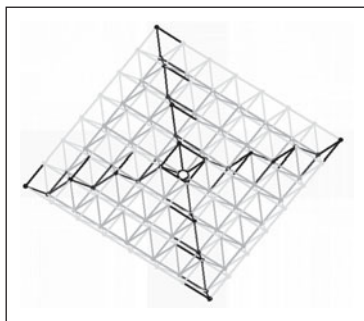


Рис. 2. Схема образования полноценной пространственной стержневой конструкции

ние ванной сварки. Ванная сварка позволяет получить единый сварной шов, скрепляющий все фасонки за один проход, с полным проплавлением и минимальным габаритом.

Для уменьшения транспортировочного габарита монтажного элемента поясные и раскосные элементы проектируют с возможностью поворота вокруг оси их прикрепления к узловому элементу. Таким образом, монтажный элемент на время транспортировки имеет меньший объем, чем в проектном положении (рис. 1).

Это дает возможность перевозить в транспортном средстве большее количество монтажных элементов, эффективнее используя при этом его грузоподъемность и снижая стоимость перевозки.

При установке монтажного элемента в конструкцию пояса раскосы выставляют в проектное положение путем поворота вокруг болта и закрепляют их, затягивая болт до необходимого усилия. Надежное закрепление болтов позволяет обеспечить совместную работу всех монтажных элементов конструкции.

Предполагается, что

Для уменьшения транспортировочного габарита монтажного элемента поясные и раскосные элементы проектируют с возможностью поворота вокруг оси их прикрепления к узловому элементу. Таким образом, монтажный элемент на время транспортировки имеет меньший объем, чем в проектном положении (рис. 1).

Это дает возможность перевозить в транспортном средстве большее количество монтажных элементов, эффективнее используя при этом его грузоподъемность и снижая стоимость перевозки.

При установке монтажного элемента в конструкцию пояса раскосы выставляют в проектное положение путем поворота вокруг болта и закрепляют их, затягивая болт до необходимого усилия. Надежное закрепление болтов позволяет обеспечить совместную работу всех монтажных элементов конструкции.

Предполагается, что

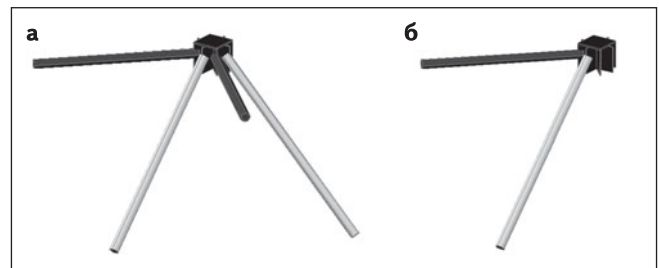


Рис. 3. Отправочные марки рядовая (а) и угловая (б)

монтажный элемент будет доставляться на строительную площадку в свернутом положении. Конструкция покрытия в целом будет собираться из развернутых монтажных элементов. На рис. 2 показана схема образования полноценной пространственной стержневой конструкции из предложенного монтажного элемента на примере сборки квадратной в плане структурной плиты.

Для создания геометрической завершенности всей конструкции используют отправочные марки двух типов: рядовые и угловые (рис. 3). Верхние рядовые отправочные элементы конструктивно аналогичны нижним элементам.

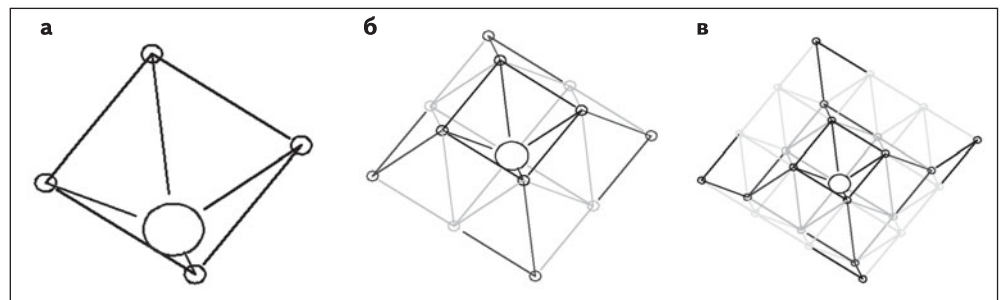
Замыкающим монтажным элементом для образования центральной пирамиды служит отдельный узел, аналогичный применяемым в отправочных марках, но лишенный собственных стержневых элементов. Точность и качество его изготовления должны быть высокими, так как погрешности направления его фасонки определяют точность при сборке всей конструкции.

Сборка структурной конструкции осуществляется в три основных этапа (рис. 4): сборка центральной пирамиды; наращивание к центральной пирамиде нижнего пояса; наращивание верхнего пояса.

Чередование второго и третьего этапов дает возможность получить конструкцию требуемых размеров.

Из рис. 4 видно, что при постепенном наращивании конструкции и закреплении элементов каждого этапа получается самостоятельная несущая конструкция, не требующая установки дополнительных доборных элементов. Это позволяет использовать для монтажа метод наращивания на проектной отметке или, например, увеличивать размеры существующего структурного покрытия путем присоединения новых трансформирующихся отправочных марок.

Рис. 4. Первый (а), второй (б) и третий (в) этапы сборки структурной конструкции



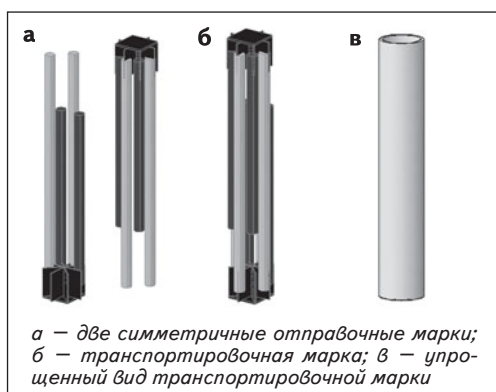


Рис. 5. Схема образования транспортировочной марки

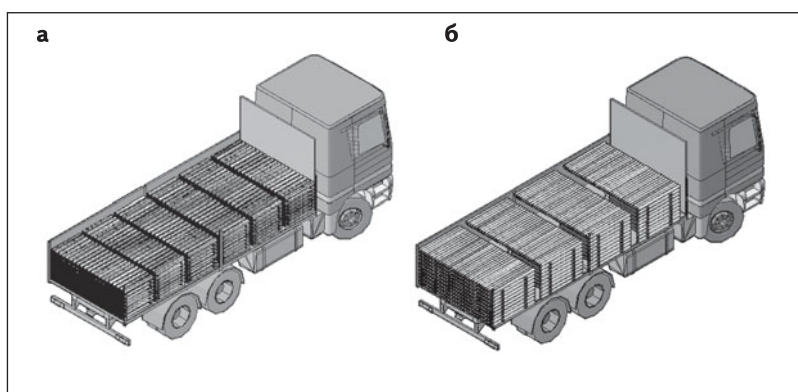


Рис. 6. Транспортировка отдельных линейных элементов (а) и трансформирующихся марок (б)

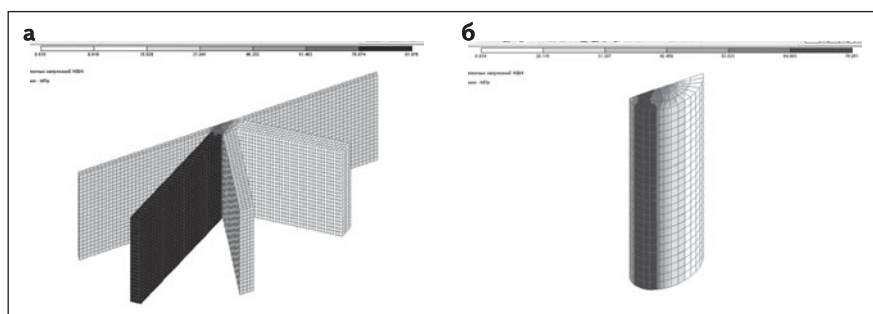


Рис. 7. Изополя эквивалентных напряжений в узловом элементе (а) и в центральном шве (б)

При транспортировке трансформирующейся отправочной марки возможны два варианта ее раскладки в транспортном средстве: одиночных отправочных марок; объединенных марок (транспортировочная марка). Схема образования транспортировочной марки показана на рис. 5.

Очевидно, что применение второго варианта транспортирования способствует увеличению коэффициента использования транспортного средства. Авторами статьи проведено исследование рациональности использования транспортного пространства при перевозке отправочных марок различных габаритов. За критерий оценки рациональности принят коэффициент использования транспортного средства. В результате установлено, что для трансформирующейся отправочной марки значения этого коэффициента близки к подобному показателю для отдельных линейных стержневых элементов. Подобие этих двух транспортировочных ситуаций проиллюстрировано на рис. 6, где представлены варианты раскладки транспортируемых элементов в виде отдельных линейных элементов и предложенного трансформирующегося элемента.

Решая задачу эффективности применения предложенного монтажного элемента комплексно, следует уделить внимание определению его весовых характеристик. Стержневые элементы в реальной конструкции будут обладать конечными габаритами сечений, определяемыми для конкретных условий загрузки и размеров итоговой конструкции. Размеры стержневых элементов, объединяемых в

узле, определяют размеры узловых фасонки и узлового элемента в целом. Особенность узлового элемента, отмеченная нами ранее — наличие центрального сварного шва, накладывает на него жесткое требование обеспечения достаточной надежности соединения. Очевидно, что особое внимание следует уделить прочностным расчетам по обеспечению надежности предложенного узлового соединения. Требуемая несущая способность узлового соединения будет обеспечиваться прочностными

характеристиками шва и его геометрическими параметрами. При определении весовых характеристик узлового элемента нельзя обойти вопрос о нахождении требуемых габаритов центрального шва, скрепляющего все несущие фасонки узлового элемента.

Для определения необходимого диаметра центрального шва, обеспечивающего несущую способность узлового элемента, авторами проведен ряд численных экспериментов с применением современных расчетных комплексов структурного анализа, реализующих в своей структуре метод конечных элементов. Некоторые результаты исследований представлены графически в виде изополей эквивалентных напряжений (рис. 7).

Отметим, что требуемый диаметр центрального шва можно определить из условия недопущения превышения эквивалентными напряжениями принятого расчетного сопротивления шва, т. е.

$$\sigma_{\text{э}} \leq R_{\text{ш}} \gamma_c, \quad (1)$$

где $R_{\text{ш}}$ — расчетное сопротивление шва; γ_c — коэффициент условий работы соединения.

Отсюда методом последовательного перебора можно определить требуемый диаметр шва. Минимально необходимый диаметр шва определяется из конструктивного ограничения, связанного с требованием объединения в узле n фасонки заданной толщины $t_{\text{ф}}$

$$d_{\text{ш}} \geq [d_{\text{ш}}] = \frac{nt_{\text{ф}}}{\pi}, \quad (2)$$

где для этого случая $n = 8$.

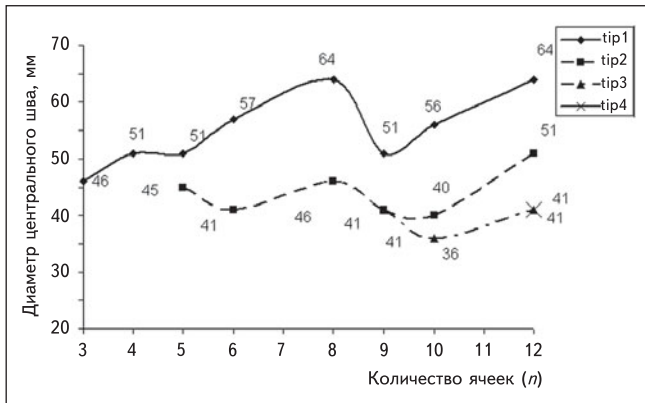


Рис. 8. Зависимость диаметра центрального шва от размера поясной ячейки и положения опор

Авторами статьи была решена задача по нахождению требуемого диаметра центрального шва для условий равномерного нагружения конструкции постоянной нагрузкой при различных вариантах ее опирания. Были рассмотрены четыре варианта опирания конструкции (переменная *tip* на рис. 8):

- четыре опорные точки в верхних углах конструкции;
- четыре опорные точки в нижних углах конструкции;
- опорные точки по всему верхнему периметру конструкции;
- опорные точки по всему нижнему периметру конструкции.

В результате численного решения задачи была построена зависимость диаметра шва от двух параметров – количества ячеек и варианта опирания (см. рис. 8).

Массу узловых элементов предлагается определять по следующей формуле

$$G_y = \sum_{j=1}^k m_j = \gamma \sum_{j=1}^k V_j, \quad (3)$$

где γ – удельный вес материала узлового элемента; V_j – объем j -го узла

$$V_j = 8 V_{\text{ф}} + V_{\text{шв}} + 8 V_{\text{б}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{ф}}$ – объем одной фасонки; $V_{\text{шв}}$ – объем центрального шва; $V_{\text{б}}$ – объем болта, прикрепляющего стержневой элемент к фасонке

$$V_{\text{ф}} = h_{\text{ф}} t_{\text{ф}} l_{\text{ф}} - d_{\text{отв.б}} t_{\text{ф}}. \quad (5)$$

Все обозначения в формуле (5) представлены на рис. 9.

$$h_{\text{ф}} = \frac{2N}{R_y \gamma_c 2t_i} + d_6 + 2, \quad (6)$$

где N – максимальное усилие в элементах отправочной марки; R_y – расчетные сопротивления стали фасонки; t_i – толщина стенки элемента; d_6 – диаметр болта.

Из условия смятия стенок стержневого элемента:

$$t_{\text{ф}} = 2t_i; \quad (7)$$

$$l_{\text{ф}} = \Delta + \sqrt{(1,5d_6)^2 + \left[0,5 \left(\frac{\pi D_i}{2} - 2t_i\right)\right]^2} + 1,5d_6, \quad (8)$$

где Δ – зазор между радиусом вращения торца стержневого элемента и центральным швом; D_i , t_i – наружный диаметр и толщина стенки элемента.

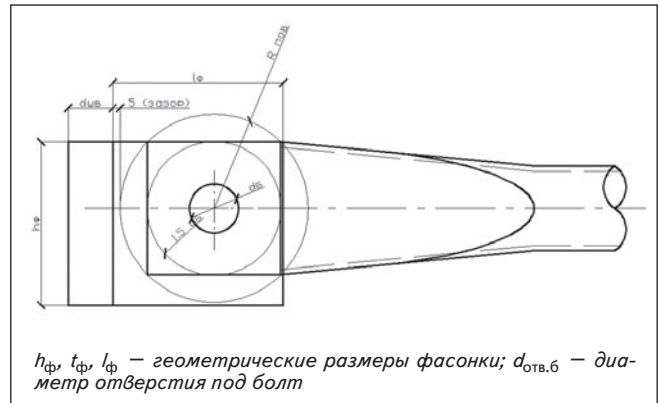


Рис. 9. К определению геометрических размеров узлового соединения

$$V_{\text{ш}} = \frac{\pi d_{\text{ш}}^2}{4} h_{\text{ф}}; \quad (9) \quad V_{\text{б}} = \frac{m_{\text{б}}}{\gamma}. \quad (10)$$

Массу болта $m_{\text{б}}$ можно определить по его диаметру и длине

$$d_6 = \sqrt{\frac{4N}{R_{\text{сб}} \gamma_c \pi}}, \quad (11)$$

где $R_{\text{сб}}$ – расчетное сопротивления болта.

Подставляя полученные выражения в формулу (4), получим формулу (12), позволяющую определять массу узлового элемента по принятым в задаче параметрам:

$$G_j = \gamma \left\{ 8 \left[\left(\frac{2N}{R_y \gamma_c 2t_i} + d_6 + 2 \right) 2t_i \times \left(5 + \sqrt{(1,5d_6)^2 + \left[0,5 \left(\frac{\pi D_i}{2} - 2t_i\right)\right]^2} + 1,5d_6 \right) - (d_6 + 2) 2t_i \right] + \frac{\pi d_{\text{шв}}^2}{4} \left(\frac{2N}{R_y \gamma_c 2t_i} + d_6 + 2 \right) + \frac{8m_{\text{б}}}{\gamma} \right\}. \quad (12)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатов В. Ю. К вопросу формообразования пространственных решетчатых стержневых конструкций // Традиции и инновации в стр-ве и архит.: материалы 67-й Всерос. науч.-техн. конф. по итогам НИР за 2009 г./ под ред. Н. Г. Чумаченко. Самара : СГАСУ, 2010. С. 745–749.
2. Алпатов В. Ю. Особенности формообразования вваренных пространственно-стержневых металлических конструкций с прямоугольным контуром // Пром. и гражд. стр-во. 2009. № 12. С. 62–66.
3. Клячин А. З. Металлические решетчатые пространственные конструкции регулярной структуры (разработка, исследование, опыт применения). Екатеринбург : Алмаз, 1994. 76 с.
4. Хисамов Р. И., Исаева Л. А. Определение технико-экономических показателей структурных покрытий. Казань: Казан. инж.-строит. ин-т, 1979. 80 с. ■