

В.Ю. АЛПАТОВ
А.О. ЛУКИН
А.А. САХАРОВ
Д.И. ЖУЧЕНКО

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

COMPUTER MODELING AND NUMERICAL STUDIES OF NODAL JOINTS OF FRAME STRUCTURES

Проведены исследования напряжённо-деформированных состояний двух типов узлов – узла MARKHI и авторского узла, выполненного на листовых фасонках. Проанализирована надёжность узлов пространственной конструкции при помощи современных расчётных комплексов структурного анализа механических систем. В качестве инструментов для исследования были выбраны расчётные комплексы LIRA, Cosmos Works, DesignSpace, SCAD. Организованы итерационные процессы поиска рациональной геометрии узлов. Установлено, что для узлов, выполняемых на основе массивной детали, итерационный поиск удобно организовать путём устранения «лишнего» материала, а для узлов на листовых фасонках – путём добавления «недостающего» материала. На основании проведённых работ даны рекомендации по рациональному проектированию узлов, указанных типов.

Ключевые слова: *структурные конструкции, узел, узловой коннектор, листовые фасонки, массивное тело, напряжённо-деформированное состояние, численное исследование, компьютерное моделирование*

Структурные конструкции относятся к классу пространственных решетчатых конструкций. Наиболее часто они применяются в качестве конструкций покрытий и перекрытий зданий. Обладая повышенной жёсткостью в сравнении с плоскими конструкциями покрытий, структурные конструкции могут применяться для перекрытия больших пролётов [1–5].

Особенностью структурных конструкций является необходимость выполнения трудоёмких узловых соединений [6–11]. В узлах данных конструкций могут сопрягаться до восемнадцати стержней [2, 9, 12]. Сложности исполнения узлов, а также сложности, связанные с изготовлением и монтажом структурных конструкций, являются основными причинами, ограничивающими их массовое использование.

По конструктивным особенностям узловых соединений структурные конструкции подразделяют на типы. Известны структурные конструкции с узлами на листовых фасонках, на ванной сварке, с шаровым коннектором, с многогранником, со штампованной фасонкой, на болтах, на «ежах» и пр. [13–19].

Stress-strain states of two types of nodes – MARKHI node and author's node on sheet plates – are studied. Reliability of space structure nodes is analyzed with the use of modern computing complexes for structural analysis of mechanical systems. Computing complexes LIRA, Cosmos Works, DesignSpace, SCAD are used as research tools. Iterative processes of search for nodes rational geometry are organized. It is found that iterative search for nodes on the base of massive body should be organized by elimination of excessive material, but for nodes on sheet plates – by addition of «missing» material. Prescriptions for rational design of both types of nodes are done.

Keywords: *frame structures, node, nodal joint, sheet plates, massive body, stress-strain state, numerical study, computer modeling*

Структурные конструкции воспринимают внешние нагрузки всеми своими элементами, поэтому каждое узловое соединение находится в сложном напряжённом состоянии. Конструкция узлового соединения во многом определяет надёжность и экономичность структурной конструкции. Надёжность узла пространственной конструкции можно проанализировать и спрогнозировать на стадии конструирования при помощи современных расчётных комплексов структурного анализа механических систем. Такие программные комплексы, как ANSYS, ABACUS, Autodesk Robot, SAP2000, STAAD, NASTRAN, Cosmos Works, LIRA, SCAD и др. позволяют выполнить анализ напряжённо-деформированного состояния узлового соединения структурной конструкции [12, 14, 15, 18, 19].

Разнообразные узлы структурных конструкций приводят к подобным, объединяя их по типу. Среди узлов данных конструкций можно выделить два сильно отличающихся друг от друга типа – это узлы, выполняемые на основе массивной детали (Meго и др.), и узлы, выполняемые на основе тонких металли-

ческих листов (Юнистрэт и др.) [2, 4, 7]. Как показывают исследования, напряжённо-деформированные состояния узлов, выполняемых на основе массивной детали, и узлов, выполняемых на листовых фасонках, сильно отличаются [9, 12, 19]. Для массивных узлов характерны малая деформативность и наличие участков с относительно малым уровнем напряжений. Для узлов на листовых фасонках характерны податливость и наличие участков с уровнем напряжений, превышающим предел текучести материала.

Рациональное (оптимальное) проектирование узлов структурных конструкций зависит от типа узлового соединения. Приёмы оптимального проектирования для массивных узлов и для узлов из тонкостенных элементов сильно отличаются. Поиск оптимального решения узла структурной конструкции можно организовать в виде итерационного процесса, при котором на каждом шаге конструирования меняется геометрический параметр узла и выполняется анализ его напряжённо-деформированного состояния средствами современных расчётных комплексов. Исследования показывают, что такой итерационный процесс для разных типов узлов удобно организовать по-разному.

В узлах на основе массивной детали, как правило, жёсткость обеспечена с запасом, а распределение внутренних напряжений происходит по наиболее коротким направлениям от нагруженных участков к опоре. Поэтому в массивных узлах можно найти участки, которые оказываются практически незагруженными, их можно «безболезненно» удалить.

В узлах на листовых фасонках наблюдается большая деформативность, жёсткость узла приходится обеспечивать, используя специальные приёмы, а напряжения имеют локально сосредоточенный характер. Поэтому необходимо искать решения по локальному упрочнению и упрочнению таких узлов, например, путём установки рёбер или локальных утолщений фасонки. В данных узлах изначально заложен принцип концентрации материала, поэтому избыточный материал в их конструкции практически отсутствует.

Авторами были выполнены исследования напряжённых состояний указанных типов узлов. Объектами исследований выбраны узел МАРХИ и узел авторской разработки, выполненный на листовых фасонках [20].

Цель исследований – установление фактического напряжённо-деформированного состояния узлов различного типа и поиск путей их конструктивного улучшения.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбор инструмента (средства) для анализа напряжённо-деформированного состояния узлов указанных типов.

2. Построение достоверных геометрических моделей объектов исследования, позволяющих учесть все их конструктивные особенности.

3. Создание расчётных моделей объектов исследования с максимально достоверным их описанием.

4. Расчёт объектов и анализ полученных результатов.

В качестве инструментов для исследований были выбраны расчётные комплексы LIRA, Cosmos Works, DesignSpace, SCAD. Все они работают на основе метода конечных элементов и способны выполнять анализ напряжённо-деформированного состояния твёрдых тел. Выбор нескольких расчётных комплексов был обоснован стремлением ограничить влияние особенностей отдельных комплексов на конечный результат, попыткой избавиться от возможных расчётных и программных ошибок комплексов, стремлением нивелировать влияние расчётных параметров комплексов (типы конечных элементов, создание сетки конечных элементов, возможности описания граничных условий, нагрузок и контактов деталей и пр.) на конечный результат расчёта.

Для анализа в расчётных комплексах Cosmos Works и DesignSpace геометрические модели объектов исследования были построены при помощи программного комплекса Solid Works. Для анализа объектов в расчётных комплексах LIRA, SCAD геометрическая модель строилась средствами самих расчётных комплексов.

При создании расчётных моделей использовались индивидуальные особенности каждого расчётного комплекса для создания максимально достоверного описания моделей. Модели, построенные различными комплексами, имели некоторые отличия. Общими для полученных моделей были: общая геометрия (за исключением отдельных малых подробностей, таких как, например, скругление кромок), физико-механические характеристики материала, характер загрузки и характер граничных условий.

Распределение внутренних напряжений в массивном теле с внутренними пустотами в виде «пересечения отверстий» под болты имеет характерный для кристаллических структур вид. Напряжения концентрируются от мест приложений усилий и по кратчайшим расстояниям перераспределяются на опору. Имеющаяся пустотность массивного тела в верхней его части (места установки болтов) вызывает концентрацию напряжений в «узких» местах. В нижней части массивного тела коннектора (ближе к опорной плоскости), где материала больше, а пустотность меньше, уровень напряжённости снижается. Поверхностные участки коннектора, находящиеся на удалении границ контактов коннектор-гайка и коннектор-болт, оказываются относительно мало задействованными в силовой работе узла. Речь идёт об

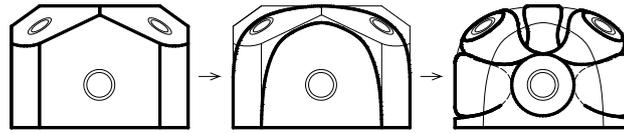


Рис. 1. Процесс итерационного изменения геометрии узла, выполненного на основе массивной детали

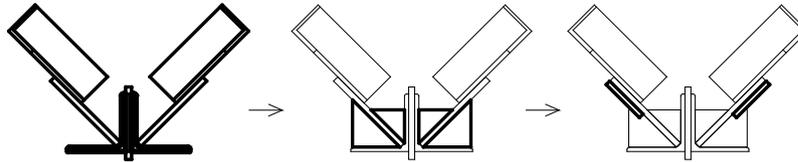


Рис. 2. Процесс итерационного изменения геометрии узла, выполненного на листовых фасонках

участках рёбер наружных граней многогранника коннектора. В этих местах материал может быть совсем убран, вследствие чего внешне коннектор из многогранника превратится сначала в шар (характерный для узла Мерио), а далее в более сложную фигуру.

В процессе итерационного изменения геометрии узла, выполненного на основе массивной детали, наблюдалось вырождение массивного тела в элемент, похожий на кристалл (рис. 1). После удаления «избыточного» материала после каждой итерации получался облегчённый узел, все более удаляющийся от понятия массивное тело.

Для узла, выполненного на листовых фасонках, был реализован итерационный процесс по добавлению материала. В результате реализации данного алгоритма узел преобразовывался, приходя к более жёсткой конструкции за счёт добавления рёбер и локальных утолщений (рис. 2).

Выводы. 1. В результате расчёта каждого из двух узлов в четырёх расчётных комплексах были построены картины распределения напряжений и картины деформирования. Найденны их «слабые места» и мало нагруженные участки.

2. Установлено, что результаты расчётов, выполненных с использованием различных расчётных комплексов, имеют приемлемую сходимость. Погрешность при вычислении напряжений не превышает 10 %.

3. Алгоритм итерационного поиска оптимальной геометрии узла удобно организовать: для массивной детали – путем удаления «лишнего» материала; для листовых фасонки – путём добавления «недостающего» материала.

4. В узле, выполненном на основе массивной детали, имеются участки с малыми напряжениями, которые можно «безболезненно» удалить. В результате последовательного удаления «лишнего» материала из детали геометрия узла стремится приобрести форму, схожую с кристаллом.

5. В узле, выполненном на листовых фасонках, наблюдается большая деформативность, а напря-

жения имеют локально сосредоточенный характер. В результате последовательного добавления материала в виде рёбер и локальных утолщений фасонки узел преобразовывается, приходя к более жёсткой конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холопов И.С., Бальзанников М.И., Алпатов В.Ю. Применение решетчатых пространственных металлических конструкций в покрытиях машинных залов ГЭС // Вестник ВолгГАСУ. 2012. Вып. 28(47). С. 225–232.
2. Трофимов В.Н., Бегун Б.Г. Структурные конструкции (исследование, расчет и проектирование). М.: Стройиздат, 1972. 155 с.
3. Холопов И.С., Алпатов В.Ю., Мочальников В.Н., Моисеев Н.Н., Вещин В.Ю. Опыт применения пространственных стержневых металлических конструкций типа структур в строительстве // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте: материалы Международной научно-технической конференции / СамГАСА. Самара, 2002. С. 199–206.
4. Файбишенко В.К. Металлические перекрестно-стержневые пространственные конструкции покрытий. М.: ВНИИТПИ, 1990. 83 с.
5. Перельмутер А.В., Юрченко В.В. О расчете пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 6. С. 155–158.
6. Муцанов А.В., Муцанов В.Ф., Роменский И.В. Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №2(41). С. 18–29.
7. Хисамов Р.И., Исаева Л.А. Определение технико-экономических показателей структурных покрытий. Казань: Казанский инженерно-строительный институт, 1979. 80 с.
8. Мажид К.И. Оптимальное проектирование конструкций. М: Высшая школа, 1979. 237 с.
9. Алпатов В.Ю. Оптимальное проектирование металлических структур: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2002. 160 с.
10. Алпатов В.Ю., Лукин А.О., Петров С.М. Учет требований устойчивости к развитию прогрессирующей

щего разрушения при оптимальном проектировании металлических структурных покрытий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 3. С.47–51.

11. Гордеева Т.Е., Беломытцева Н.С. Влияние конструктивной схемы здания на развитие прогрессирующих обрушений // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность: сборник статей / СГАСУ. Самара, 2015. С. 406–410.*

12. Алпатов В.Ю., Холопов И.С., Соловьёв А.В. Численные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния узла пространственной решетчатой конструкции с использованием нескольких САПР // *Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве и архитектуре: сборник статей Международной конференции. Липецк: ЛГТУ, 2009. С.122–127.*

13. Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Роменский И.В., Муцанов А.В. Влияние геометрических параметров на напряженно-деформированное состояние структурного покрытия на прямоугольном плане // *Металлические конструкции. Макеевка (Украина), 2015. Т. 21, №4. С. 191–206.*

14. Шалобыта Н.Н. Экспериментальное исследование несущей способности узлов структурных конструкций системы «БрГТУ» // *Вестник БрГТУ*. 2008. №1(49). С. 94–102.

Об авторах:

АЛПАТОВ Вадим Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций Самарский государственный технический университет
Архитектурно-строительный институт
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: avu75@mail.ru

ЛУКИН Алексей Олегович

ассистент кафедры сопротивления материалов и строительной механики Самарский государственный технический университет
Архитектурно-строительный институт
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: a.o.lukin@rambler.ru

САХАРОВ Андрей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций Самарский государственный технический университет
Архитектурно-строительный институт
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: 2421200@mail.ru

ЖУЧЕНКО Дмитрий Игоревич

магистрант факультета промышленного и гражданского строительства Самарский государственный технический университет
Архитектурно-строительный институт
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: zagzag1094@gmail.com

15. Бузало Н.А., Алексеев С.А., Царитова Н.Г. Применение программных комплексов для компьютерного моделирования узлов пространственных стержневых конструкций // *Строительство–2014: современные проблемы промышленного и гражданского строительства: материалы международной научно-практической конференции / Институт промышленного и гражданского строительства. 2014. С. 215–216.*

16. Пат. 2467133 РФ. Узловое соединение тонкостенных стержней пространственной конструкции / Тур А.В., Тур В.И., Холопов И.С. // *Бюл.* 2011. № 32.

17. Пат. 2468157 РФ. Узловое соединение тонкостенных стержней пространственной конструкции / Селин С.А., Тур А.В., Тур В.И. // *Бюл.* 2012. № 33.

18. Холопов И.С., Тур В.И., Тур А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния узлового соединения сетчатого купола // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2012. №4. С. 104–111.

19. Бузало Н.А., Алексеев С.А., Царитова Н.Г. Численное исследование шарнирного узла пространственной стержневой конструкции // *Науковедение: Интернет-журнал*. 2014. № 2. С. 1–13.

20. Пат. 33381 РФ. Стержневая структурная конструкция из длинноразмерных элементов / Алпатов В.Ю., Холопов И.С. // *Бюл.* 2003. № 29.

ALPATOV Vadim Yu.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Metal and Wooden Structures Chair
Samara State Technical University
Institute of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: avu75@mail.ru

LUKIN Alexey O.

Assistant of the Resistance of Materials and Construction Mechanics Chair
Samara State Technical University
Institute of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: a.o.lukin@rambler.ru

SAKHAROV Andrey A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Metal and Wooden Structures Chair
Samara State Technical University
Institute of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: 2421200@mail.ru

ZHUCHENKO Dmitry I.

Master's Degree Student of the Faculty of Industrial and Civil Engineering
Samara State Technical University
Institute of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: zagzag1094@gmail.com

Для цитирования: Алпатов В.Ю., Лукин А.О., Сахаров А.А., Жученко Д.И. Компьютерное моделирование и численные исследования узловых соединений структурных конструкций // *Градостроительство и архитектура*. 2016. №4(25). С. 19–22. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.04.3.

For citation: Alpatov V.Yu., Lukin A.O., Sakharov A.A., Zhuchenko D.I. Computer modeling and numerical studies of nodal joints of frame structures // *Urban Construction and Architecture*. 2016. №4(25). Pp. 19–22. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.04.3.