

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ В ЗАДАЧАХ
ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОСЕКЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ
ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**В. Н. Зимин¹, А. А. Смердов²¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. Бауманская 2-я, 5/1²АО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
Российская Федерация, 141070, г. Королев, ул. Ленина, 4а
E-mail: alexsmerdov@mail.ru

Исследуется целесообразность проектирования космических ферменных конструкций из композитных материалов. Сформулированы и проанализированы задачи, возникающие при оптимальном проектировании композитных многосекционных космических ферм.

Космические ферменные конструкции должны обеспечивать возможность закрепления на них требуемого количества навесного оборудования, что зависит от количества соединительных узлов. С другой стороны, большое количество секций и соединительных узлов утяжеляет конструкцию и усложняет процесс сборки. Таким образом, первая задача заключается в разработке алгоритма расчета оптимальных геометрических характеристик ферменной конструкции, т. е. количества секций в продольном и в окружном направлении.

Нагрузки на разные элементы космической фермы различны. Поэтому очевидно, что стержни разных секций фермы должны обладать разными характеристиками. Характеристики металлических стержней – диаметр и толщина. В случае использования композитных материалов возникает необходимость решения дополнительной задачи оптимизации. Этой задачей является определение оптимальных структурных параметров многослойных стержней: типа многослойной структуры, количества слоев, углов армирования и толщин слоев.

Крайне важной задачей является задача оптимального проектирования соединительных узлов. Исследованы возможности проектирования соединительного узла, который был бы полностью выполнен из композитных материалов.

Представлены два типа композитных соединительных узлов, из которых один уже известен и используется в космических ферменных конструкциях, а второй предложен авторами данной статьи. Приведено сравнение этих типов и обоснование целесообразности использования композитного соединительного узла предложенного типа.

С целью анализа прочности композитных соединительных узлов и их сравнения с металлическим узлом было проведено конечно-элементное моделирование нагружения этих узлов. Для этого была создана общая балочная модель фермы, и с ее помощью получены нагрузки в области наиболее нагруженного узла, которые использовались для более подробного моделирования нагружения твердотельной модели соединительных узлов. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения композитных соединительных узлов в космических ферменных конструкциях.

Ключевые слова: ферменные конструкции, композитные конструкции, соединительные узлы, оптимальное проектирование, многосекционные конструкции.

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik
Vol. 18, No. 1, P. 123–131**RESEARCHING OF PROBLEMS OF OPTIMUM DESIGN
OF COMPOSITE SPACE TRUSS STRUCTURES**V. N. Zimin¹, A. A. Smerdov²¹Bauman Moscow State Technical University
5/1, Baumanskaya 2-ya Str., Moscow, 105005, Russian Federation²Rocket space corporation "Energia"
4a, Lenina Str., Korolyov, 141070, Russian Federation
E-mail: alexsmerdov@mail.ru

The paper investigates the feasibility of the design of space truss structures made of composite materials. The problems arising in the optimal design of multicell composite space truss have been formulated and analyzed.

It's necessary to mount the required equipment on the space trusses, what depends on the number of connecting nodes. On the other hand, a large number of sections and connecting nodes made the structure more heavily and complicate. Thus, the first task is to develop an algorithm for calculating the optimal geometric characteristics of the truss, that is, the number of sections in the longitudinal and in the circumferential direction.

Loads on the different elements of the space truss are different. Therefore, it is evident that the different sections of the truss rods must have different characteristics. In the case of composite materials the solutions of further optimization task are necessary. This task is to determine the optimal structural parameters of multilayer beams – such as multilayer structure, the number of layers, reinforcing angles and layer thicknesses.

The problem of optimal design of connecting nodes is an important task. The article explores the possibility of connecting nodes, which would be entirely made of composite materials.

There are two types of composite connector assemblies, one of which is already known and used in the truss structures of space, and the second proposed by the authors of the article.

In order to analyze the strength of the composite connector assemblies and their comparison with the metal assembly finite element modeling of the load nodes was carried out. For this purpose the beam model of total truss was created. This model was used for getting loads in the most loaded node. These loads are used in the more detailed modeling of strength of composite node. The results of simulations suggest promising applications of composite connecting nodes in the space truss.

Keywords: truss structures, composite structures, connector assembly, optimal design, multicell structures.

Введение. В изделиях ракетно-космической техники ферменные конструкции занимают очень важное место. Отличительная особенность таких конструкций от других конструктивно-силовых схем – возможность закрепления навесного оборудования практически в любой точке конструкции [1–3].

Преимущества данного типа конструкций можно продемонстрировать на примере конструкции негерметичного отсека научно-энергетического модуля МКС (рис. 1) [4].

Данный отсек представляет собой ферменную многосекционную конструкцию, на которой устанавливается значительное количество различного навесного оборудования, такого как панели радиаторов, солнечные батареи с механизмом их трансформации, аккумуляторные батареи, топливные баки, компрессоры, баллоны высокого давления, двигатели, арматура и др.

При проектировании данной конструкции в качестве конструкционных материалов рассматривались алюминиевые сплавы и сталь. Из них изготовлены фитинги, стержни, крепежные элементы, различные бобышки для крепления навесного оборудования, крошечные и т. д.

Идея использования композитных материалов в ферменных многосекционных конструкциях выглядит очевидной, однако она сопряжена со многими трудностями, связанными как со сложной технологией изготовления деталей и их сборкой, так и с необходимостью постановки и исследования задач оптимального проектирования. При проектировании композитных конструкций проведение оптимизации является важной задачей, поскольку без ее проведения преимущества композитов могут быть сведены на нет из-за неудачного армирования или несовершенного закрепления композитных элементов.

Данная работа посвящена исследованию этих задач.

Первая задача. Первой задачей, которую необходимо решить, является задача разработки алгоритма расчета оптимальных геометрических характеристик

ферменной конструкции – количество секций в продольном и в окружном направлении (рис. 2).

В результате работы алгоритма должна быть спроектирована конструкция, на которой будет возможным закрепить требуемое количество навесного оборудования [5].

В ферменных конструкциях стержни соединяются с помощью соединительных узлов. Эти узлы, с одной стороны, могут являться местами крепления навесного оборудования и необходимы при сборке крупногабаритной конструкции. С другой стороны, они утяжеляют конструкцию и усложняют процесс ее изготовления. Как следствие, конструкция должна обладать оптимальным количеством соединительных узлов, которое определяется количеством секций.

Вторая задача. Помимо варьирования геометрических параметров конструкции важным является решение задачи об оптимальном проектировании стержней. Сюда включается определение диаметра и толщины стержня, а также его схемы армирования – количество слоев и их углов армирования [6; 7].

Очевидно, что для достижения равнопрочности в ферменной конструкции каждый стержень должен иметь свои значения этих структурных параметров. Технологически это нецелесообразно, в частности, в силу того, что это приведет к необходимости разработки большого количества разных соединительных узлов. Поэтому возникает задача определения оптимального количества групп стержней с одинаковыми характеристиками.

Третья задача. И, наконец, третья задача – оптимальное проектирование соединительного узла. Металлический соединительный узел является составным и выполняется фрезерованием двух или нескольких металлических заготовок с дальнейшей сборкой с помощью болтов и штифтов. Типовой металлический соединительный узел представлен на рис. 3.

Такой узел обладает значительной массой. С целью уменьшения массы конструкции выглядит логичным исследование возможности использования композитных материалов в конструкции соединительного узла [8; 9].

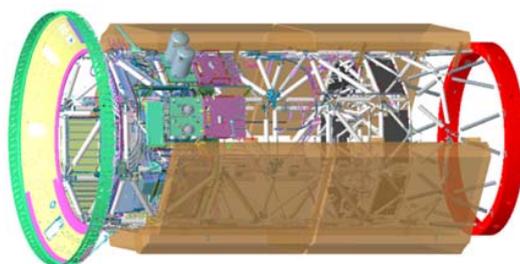


Рис. 1. Модель негерметичного отсека научно-энергетического модуля МКС

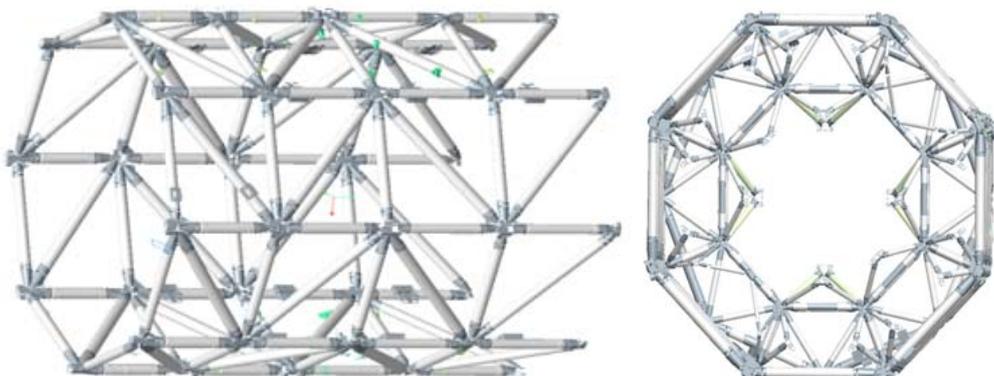


Рис. 2. Ферменная многосекционная конструкция

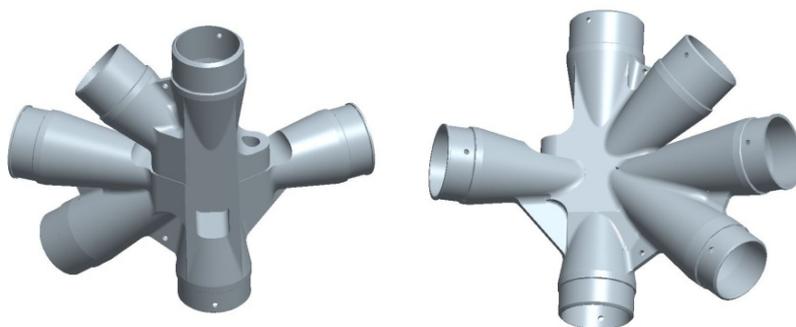


Рис. 3. Металлический соединительный узел

Одна из распространенных конструктивно-силовых схем соединения композитных стержней показана на рис. 4: композитный стержень 1 соединяется с металлической законцовкой 2 с помощью клеевого или клеомеханического соединения (рис. 4).

Далее законцовка 2 соединяется с металлическим соединительным узлом 3 с помощью сварки. Так как при сварке законцовка значительно нагревается, возникает вероятность разрушения клеевого соединения законцовки со стержнем. Поэтому необходимо удлинение законцовки с целью отдаления зоны клеевого соединения от зоны сварки, что приводит к увеличению массы законцовки.

Все это приводит к тому, что массовая доля металлических деталей в таком варианте исполнения соединения остается значительной. Таким образом, возникает необходимость проектирования оптимального соединительного узла, в котором отсутствовали бы металлические детали.

Варианты исполнения композитного соединительного узла без металлической законцовки. В данной

работе представлены проекты двух композитных соединительных узлов. Первый вариант представлен на рис. 5.

Он состоит из композитных стержней, соединяемых композитными накладками. При сборке многосекционной конструкции стержни выставляются на оснастке, после чего охватываются композитными накладками. На поверхности накладок и стержней наносится клей холодного отверждения, после чего накладки зажимаются струбцинами в зонах между стержнями [10].

В результате образуется многосекционная ферменная композитная конструкция.

Второй вариант композитного соединительного узла изображен на рис. 6.

Он состоит из центральных узлов 1, вклеенных в него вертикальных стержней 2 и диагональных стержней 3. Центральные узлы соединяются с горизонтальными стержнями 4 и композитной вставкой 5 при помощи болтового соединения, реализованного с помощью втулок 6 в центральных узлах и в горизонтальных стержнях.

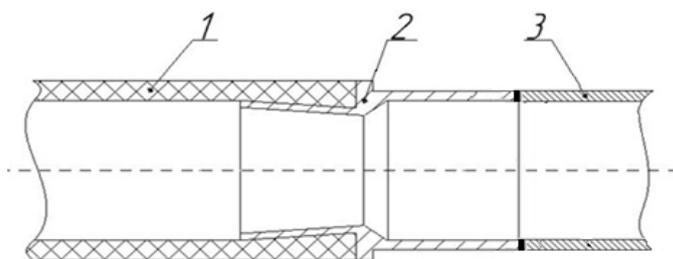


Рис. 4. Вариант исполнения соединения композитного стержня с металлическим соединительным узлом с помощью законцовки

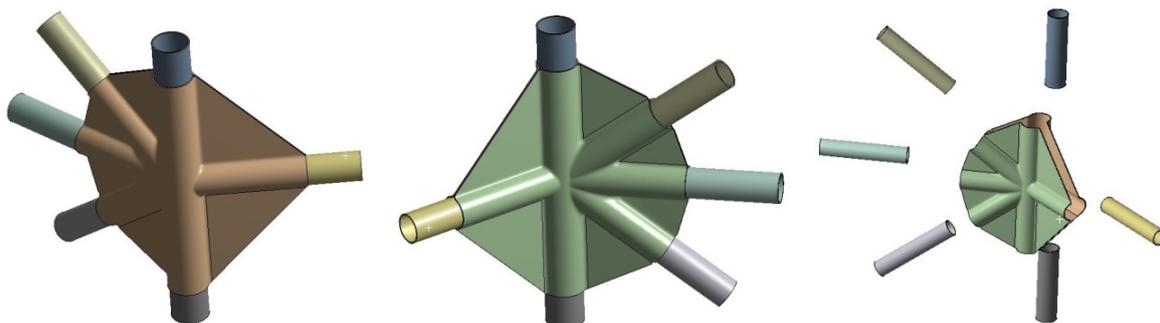


Рис. 5. Вариант исполнения композитного соединительного узла с накладками

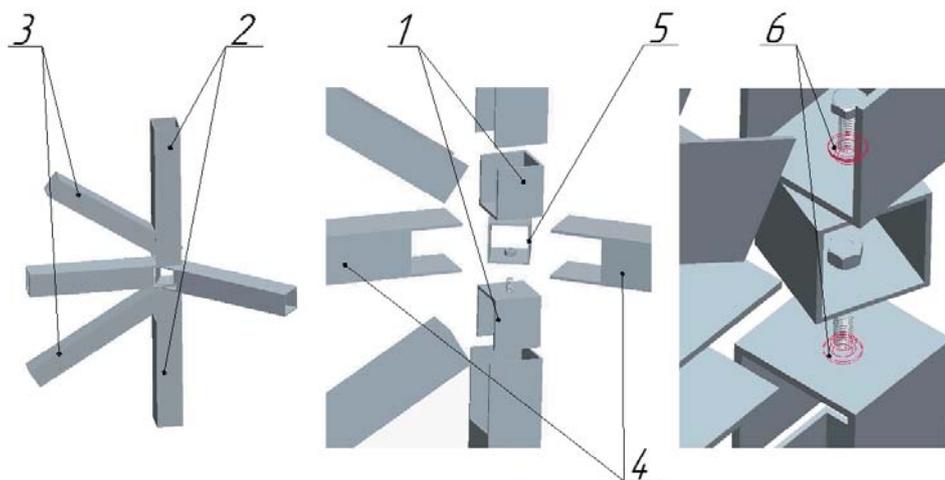


Рис. 6. Вариант исполнения композитного соединительного узла с болтовым соединением

Таким способом изготавливаются отдельные секции, соединяемые между собой болтами.

Сравнение предложенных вариантов. Оба предложенных варианта имеют как преимущества, так и недостатки. К преимуществам первого типа соединительного узла стоит отнести относительно малую массу и отработанную технологию изготовления.

Недостатками являются:

- необходимость сборки всей фермы на одной оснастке, что может быть трудновыполнимо при изготовлении крупногабаритной фермы сложной геометрии; также стоит учесть, что это приведет к определенным трудностям при транспортировке такой конструкции в полностью собранном состоянии до места запуска;

- отсутствует возможность крепления навесного оборудования к узлу.

Второй тип соединительного узла обладает несколько меньшей массой, чем первый тип, но является технологически более сложно реализуемым. При этом он обладает следующими преимуществами:

- так как при использовании данного типа узла изготавливаются секции, которые в дальнейшем собираются с помощью болтового соединения, эти секции могут быть доставлены по отдельности и собраны незадолго до запуска;

- внутренние поверхности вставки 5 могут быть использованы в качестве мест крепления навесного оборудования, что является значительным преимуществом данного типа узла.

Моделирование напряженно-деформированного состояния узлов. С целью анализа прочностных и жесткостных характеристик узлов было проведено конечно-элементное моделирование нагружения этих узлов.

Нагрузки на соединительный узел были получены при помощи моделирования нагружения общей балочной конечно-элементной модели ферменного отсека [11; 12]. В данной модели все стержни моделировались балочными элементами. Все стержни обладают толщиной 2 мм, круглые стержни имеют диаметр 50 мм. Высота и ширина сечения квадратных стержней также 50 мм. Угол армирования 0° относительно оси стержня. Соединительный узел моделировался с помощью трех пружин, направленных по трем линейным степеням свободы. Жесткость пружин принималась 107 Н/м.

При таких параметрах стержней масса композитного соединительного узла первого типа – 1,27 кг, узла второго типа – 1,56 кг, масса металлического соединительного узла – 5,92 кг.

Наиболее опасным расчетным случаем при изготовлении и эксплуатации крупногабаритных ферменных конструкций изделий РКТ, как правило, является случай разделения ступеней при выведении. К модели прикладывалось воздействие, соответствующее данному расчетному случаю.

Распределение нормальных напряжений в стержнях представлено на рис. 7. В результате расчета были определены значения узловых сил и моментов в стерж-

нях в области наиболее нагруженного узла. Полученные значения силовых факторов использовались для более подробного моделирования нагружения соединительного узла.

Конечно-элементные модели соединительных узлов первого и второго типа с приложенными силовыми факторами представлены на рис. 8.

Анализ прочности композитных вариантов был выполнен в модуле Ansys Composite PrePost.

Контакт между элементами конструкции задавался типа BONDED, т. е. элементы жестко «склеены» между собой.

Для вариантов с композитным соединительным узлом в качестве конструкционного материала была принята углеткань УТ-900, а для металлического варианта – алюминиевый сплав АМг-6.

В качестве первого приближения при сопоставлении двух композитных вариантов как друг с другом, так и с металлическим аналогом моделирование было проведено в линейной постановке как для металла, так и для композита.

Анализ прочности соединительных узлов. Напряжения для первого и второго типов соединительных узлов из композитных материалов, а также для исходного металлического соединительного узла, представлены на рис. 9–11.

На рис. 9, 10 для композитных соединительных узлов надписями max и min выделены области, в которых напряжения в различных направлениях превышают соответствующие пределы прочности.

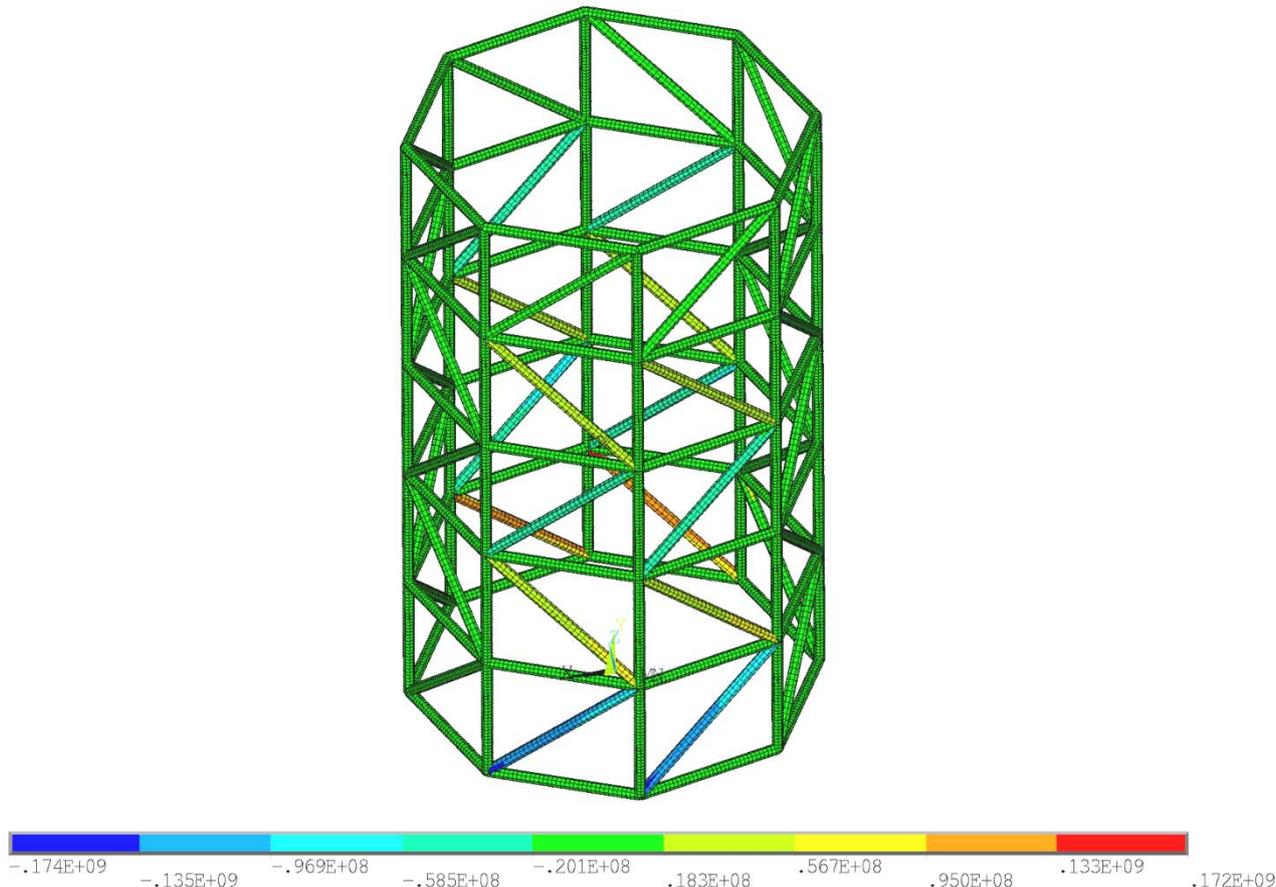


Рис. 7. Нормальные напряжения в стержнях (Па)

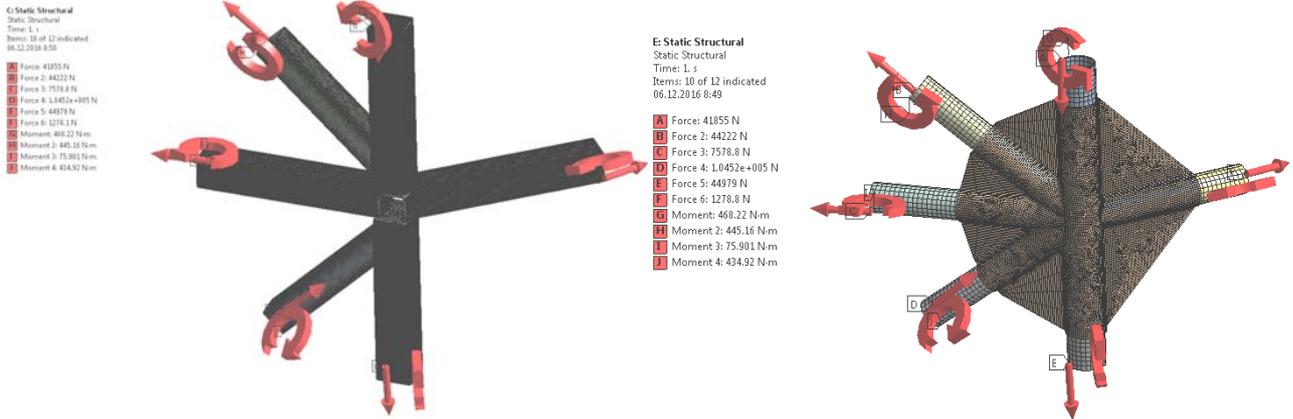


Рис. 8. Конечно-элементные модели композитных соединительных узлов первого и второго типа с приложенными силовыми факторами

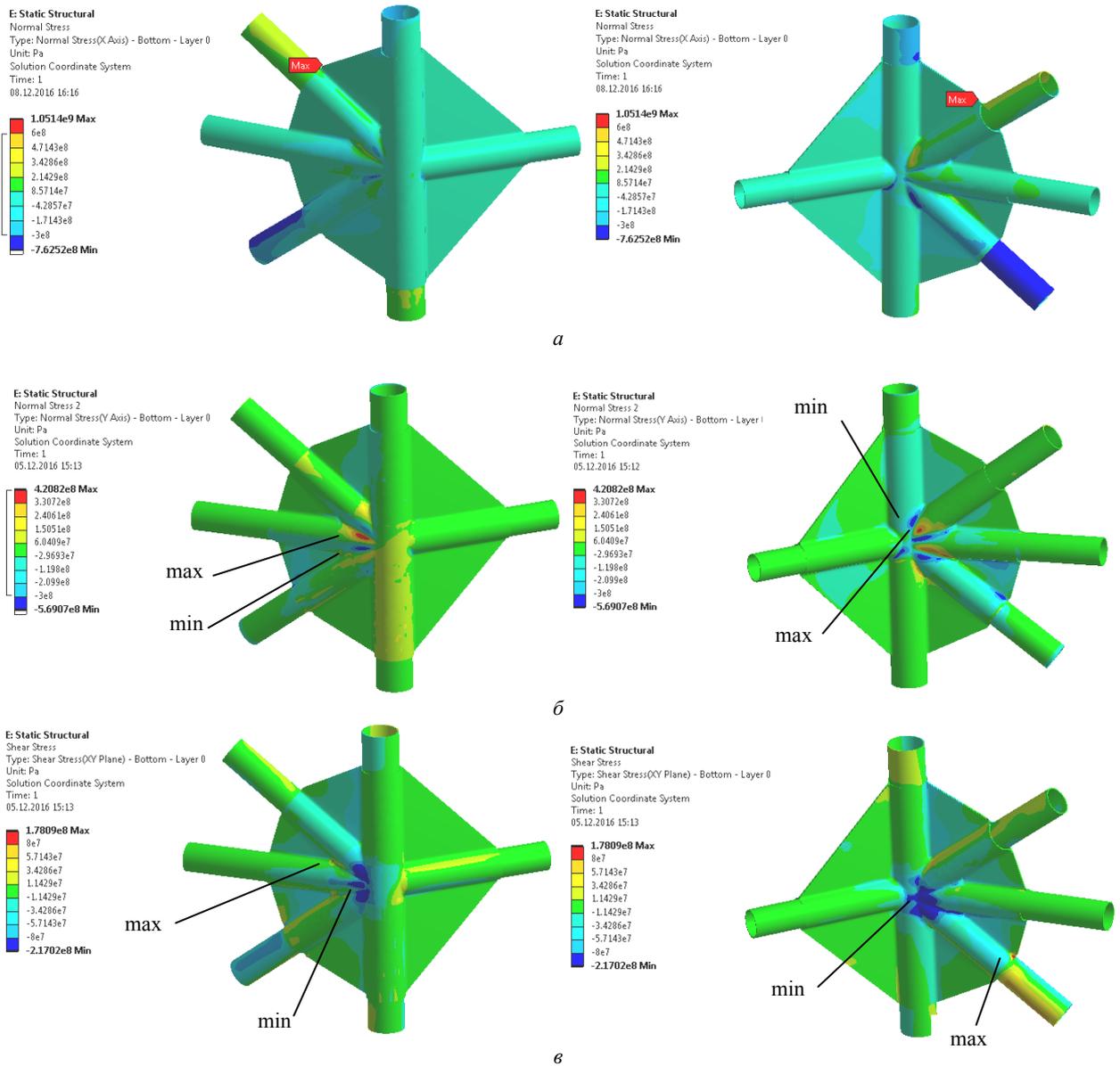


Рис. 9. Напряжения в первом типе композитного соединительного узла (Па): а – нормальные напряжения в направлении вдоль оси укладки; б – нормальные напряжения в направлении поперек оси укладки; в – сдвиговые напряжения

Из полученных результатов видно, что при данных значениях структурных параметров соединительные узлы из композитных материалов, в отличие от металлического узла, обладают запасами прочности, меньшими единицы. Однако стоит учесть ряд факторов, позволяющих утверждать, что композитные соединительные узлы могут не уступать металлическому аналогу по прочностным свойствам.

Во-первых, данный расчет для композитных вариантов проводился для накладок и стержней толщиной 2 мм. Очевидно, что достижение большей прочности соединения и при этом уменьшение массы возможно

за счет оптимального распределения материала по узлу. К примеру, в случае рассмотрения напряженно-деформированного состояния узла первого типа видно, что ребра между стержнями значительно недогружены, что позволяет профилировать геометрию и толщину ребра таким образом, чтобы соединение было ближе к равнопрочному. С другой стороны, в области концентрации напряжений между диагональными и горизонтальным стержнями возможно наложение дополнительных слоев для локального упрочнения данной области. Данный подход справедлив и для второго типа соединительного узла.

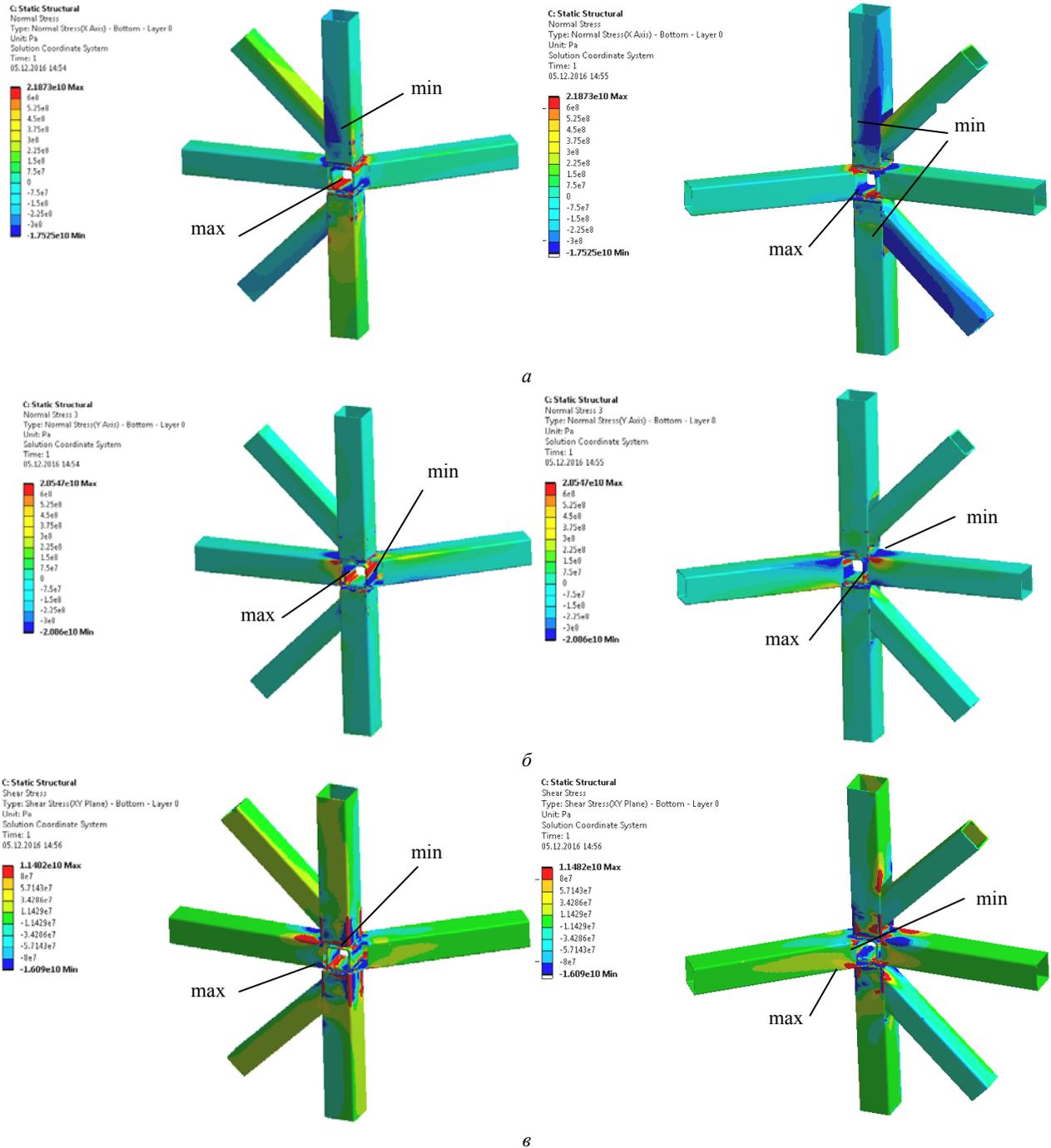


Рис. 10. Напряжения во втором типе композитного соединительного узла (Па): а – нормальные напряжения в направлении вдоль оси укладки; б – нормальные напряжения в направлении поперек оси укладки; в – сдвиговые напряжения

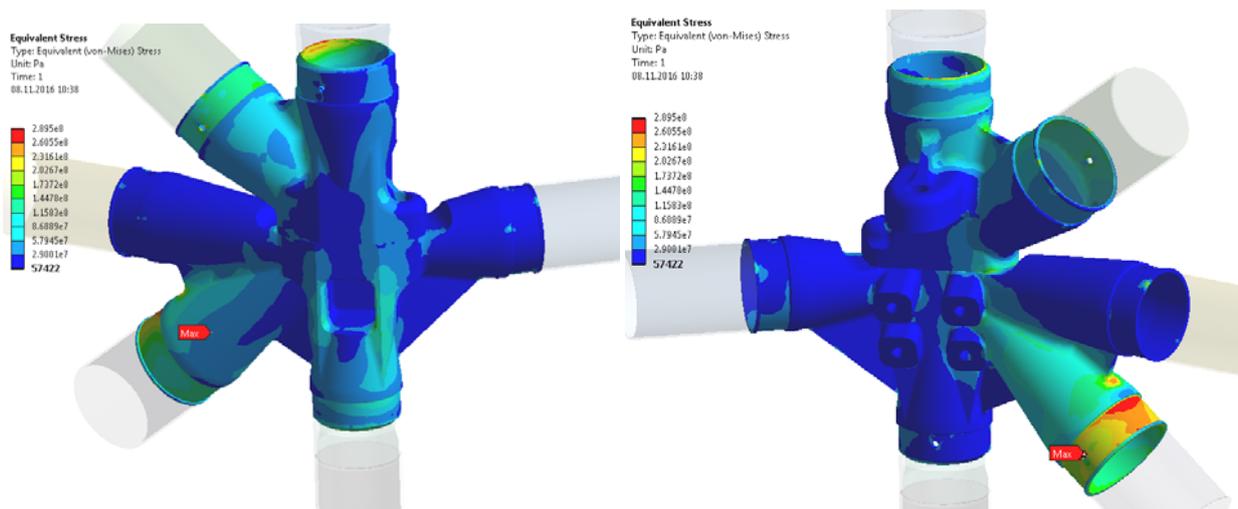


Рис. 11. Эквивалентные напряжения в металлическом соединительном узле (Па)

Во-вторых, при рассмотрении напряженно-деформированного состояния композитного соединительного узла второго типа видно, что максимальные напряжения значительно превышают предел прочности. Однако данные напряжения сосредоточены в достаточно малой области конструкции. В основном это связано с локальным изгибом элементов конструкции, чего можно избежать путем незначительного изменения конструкции, к примеру, путем добавления дополнительных ребер в местах изгиба.

В-третьих, стоит учитывать, что после разрушения матрицы композита возможна дальнейшая работа соединения. Таким образом, реальный запас прочности композитного соединения будет определяться в большей мере нормальными напряжениями, чем сдвиговыми [13–15]. Также стоит учесть, что разрушение композита имеет многостадийный характер. При моделировании разрушения композитного соединительного узла с учетом многостадийного характера разрушения будут получены запасы прочности, превосходящие те, что были получены при линейном расчете.

Таким образом, можно утверждать, что предложенные типы соединительных узлов могут быть использованы при проектировании многосекционных ферменных композитных конструкций.

Заключение. Многосекционные ферменные конструкции являются сложными объектами для проектирования. Использование композитных материалов, несмотря на дополнительные трудности, позволит значительно улучшить их массовые, прочностные и жесткостные характеристики.

Для оптимального проектирования этих конструкций требуется решение ряда задач. Некоторые из них были проанализированы в данной работе.

Первой задачей является создание алгоритма определения оптимального количества секций.

Вторая задача – задача оптимального проектирования стержней и определения оптимального количества групп стержней с одинаковыми характеристиками.

Третья задача заключается в оптимальном проектировании соединительного узла и проработке методов проектирования композитных соединительных узлов.

Исследование прочности композитных соединительных узлов при многостадийном разрушении композита и определение уточненных коэффициентов запаса прочности – это предмет дальнейших исследований.

Библиографические ссылки

1. Shenyan C., Hai H. Optimum Design of a Space Frame and its Application in Satellite Structure // Journal of spacecraft and rockets. 2010. Vol. 47, No. 6.
2. Woo T. Structural Optimization of Large Spacecraft // AIAA J. 1992. P. 92–1227.
3. Jones T. C., Bart-Smith H. Finite Element Modeling and Analysis of Large Pretensioned Space Structures // Journal of spacecraft and rockets. 2007. Vol. 44, No. 1.
4. Проектирование системы энергоснабжения научно-энергетического модуля для российского сегмента Международной космической станции / А. Г. Бидеев [и др.] // Космическая техника и технологии. 2015. № 2 (9). С. 64–74.
5. Баничук Н. В. Введение в оптимизацию конструкций. М. : Наука, 1986. 302 с.
6. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1988. 272 с. : ил. (Б-ка расчетчика).
7. Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1984. 446 с.
8. Композиционные материалы в конструкции летательных аппаратов : сб. ст. / пер. с англ. Г. А. Молодцова ; под ред. проф. А. Л. Абибова. М. : Машиностроение, 1975. 272 с.
9. Композиционные материалы. В 8 т. Т. 7. Анализ и проектирование конструкций. Ч. 1 / под ред. К. Чамиса ; пер. с англ. под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. М. : Машиностроение. 1978, 300 с. : ил.
10. Комков М. А., Тарасов В. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения : учеб. пособие. 2-е изд. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 431 с. : ил.

11. Механика больших космических конструкций / Н. В. Баничук [и др.]. М. : Факториал, 1997. 302 с. ISBN 5-88688-021-6.

12. Композиционные материалы. В 8 т. Т. 8. Анализ и проектирование конструкций. Ч. 2 / под ред. К. Чамиса ; пер. с англ. под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. М. : Машиностроение, 1978. 264 с. : ил.

13. Мэттьюс Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. М. : Техносфера, 2004. 408 с. ISBN 5-94836-032-6.

14. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов : справочник / В. И. Мяченков [и др.] ; под общ. ред. В. И. Мяченкова. М. : Машиностроение, 1989. 520 с. : ил. ISBN 5-217-00401-0.

15. Морозов Е. М., Майземнек А. Ю., Шадский А. С. Ansys в руках инженера: Механика разрушения. 2-е изд., испр. М. : ЛЕНАНД, 2010. 456 с.

References

1. Shenyang C., Hai H. Optimum Design of a Space Frame and its Application in Satellite Structure. *Journal of spacecraft and rockets*. 2010. Vol. 47, No. 6.
2. Woo T. Structural Optimization of Large Spacecraft. *AIAA J*. 1992, P. 92–1227.
3. Thomas C. Jones, Hilary Bart-Smith. Finite Element Modeling and Analysis of Large Pretensioned Space Structures. *Journal of spacecraft and rockets*. 2007, Vol. 44, No. 1.
4. Bideev A. G, Semin A. Yu., Kuznetsov A. V., Akhmedov M. R. [Designing a power supply system of the science and power module for the International Space Station Russian segment]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2015, No. 2 (9), P. 64–74 (In Russ.).
5. Banitchuk N. V. *Vvedenie v optimizatsiyu konstrukcii* [Introduction to structural optimization]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 302 p.
6. Vasiliev V. V. *Mekhanika konstrukcii iz kompozitsionnih materialov* [Structural mechanics of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 272 p.
7. Alfutov N. A., Zinoviev P. A., Popov B. G. *Raschet mnogosloinnykh plastin I obolochek iz kompozitsionnykh materialov* [Calculation of plates and shells made of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 446 p.
8. *Composicionnie materiali v konstrukcii letatelnykh apparatov. Sbornik statei* [Composite materials in aircraft structures. Digest of articles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 272 p.
9. *Kompozitsionnyye materialy. T. 7. Analiz I proyektirovaniye konstruksiy* [Composite materials. Vol 7. Analysis and design of structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 300 p.
10. Komkov M. A., Tarasov V. A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruksiy raket I sredstv porazheniya* [Winding technique of composite construction of missiles and weapon systems]. Moscow, Izdatelstvo MG TU im. N. E. Bauman Publ., 2015, 431 p.
11. Banitchuk N. B., Karpov I. I., Klimov D. M. et al. *Mekhanika bol'shikh kosmicheskikh konstruksiy* [Mechanics of large space structures]. Moscow, Faktoria Publ., 1997, 302 p.
12. *Kompozitsionnyye materialy. T. 8. Analiz I proyektirovaniye konstruksiy* [Composite Materials. Vol. 8. Analysis and design of structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 264 p.
13. Matthews F., Rawlins R. *Kompozitsionnyye materialy. Mekhanika i tekhnologiya* [Composite materials. Mechanics and technology]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004, 408 p.
14. Myachenkov V. I., Mal'tsev V. P., Mayboroda V. P. et al. *Raschety mashinostroitel'nykh konstruksit metodom konechnykh elementov* [Calculations of engineering structures using finite element method]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 520 p.
15. Morozov E. M., Mayzemnek A. Yu., Shadsky A. S. *Ansys v rukakh inzhenera: Mekhanika razrusheniya* [Ansys in the hands of the engineer: Fracture Mechanics]. Moscow, LENAND Publ., 2010, 456 p.