

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ СПЛОШНОГО И СЕТЧАТОГО АДАПТЕРОВ

Т. В. Гульков, Л. М. Ковальчук✉, Т. В. Бурнышева

Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, Российская Федерация

Целью исследования является сравнение полей напряжений и устойчивости адаптеров различной конфигурации, изготовленных из алюминия Al-2024 и композита М46. Адаптеры имеют постоянную массу. Сплошной и сетчатый адаптеры усиливались жесткими шпангоутами по кромкам конструкций, нижние кромки фиксировались жесткой заделкой. Моделирование параметрических дискретных моделей проводилось в конечно-элементном программном комплексе ANSYS. Для сетчатого адаптера использовался балочный двухузловой конечный элемент с шестью степенями свободы BEAM4. В сплошной адаптер закладывался четырехузловой с шестью степенями свободы на каждый из узлов конечный элемент SHELL181. Нагрузка на конструкцию передавалась с использованием топологических связей с мнимым узлом, расположенным по центру верхнего шпангоута. Топологические связи моделировались жестким элементом MPC 184. К мнимому узлу прикладывалась осевая сжимающая нагрузка, равная 108 тс. Анализ напряженно-деформированного состояния сплошных адаптеров показал, что адаптер из углепластика держит нагрузку лучше, чем алюминиевый. Значения критической нагрузки потери устойчивости алюминиевого адаптера меньше, чем значения критической нагрузки адаптера из углепластика. Анализ полей напряжений и перемещений показал, что в сетчатом адаптере спиральные ребра работают на сжатие, а кольцевые на растяжение. Сравнение полей напряжений сетчатого и сплошного адаптеров, а также значений критических нагрузок позволяет сделать вывод о том, что эффективнее в изделии использовать сетчатую конструкцию.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, устойчивость, адаптер, ANSYS, поля напряжений, критическая нагрузка.

Поступила в редакцию: 12.02.2025. Принята к печати: 09.09.2025.

Введение

Выводимые на орбиту космические летательные аппараты бывают различных размеров и форм. Поэтому при проектировании таких изделий основным вопросом является их размещение в ракете-носителе в качестве полезного груза. Решением данного вопроса является либо проектирование космического аппарата под конструкцию ракеты-носителя, либо использование переходной системы-адаптера, которая стыкует ракету-носитель и запускаемый аппарат [1].

Адаптеры бывают сплошные и сетчатые, изготовленные из композитов или металлов. Они применяются в конструкциях межступеней и обтека-

телей космических носителей. Сетчатые адаптеры представляют собой конические решетчатые оболочки, состоящие из системы спиральных и кольцевых ребер. Использование сетчатых адаптеров позволяет при минимальной массе иметь высокую прочность и жесткость конструкции [2].

1. Описание исходной конструкции и постановка задачи

В работе рассматриваются конструкции сетчатого и сплошного адаптеров (рисунок 1). За исходную конструкцию принимался сетчатый адаптер, состоящий из пересекающихся спиральных и кольцевых ребер, подкрепленных на нижней и верхней кромках шпангоутами. Исходная конструкция изготовлена из углепластика марки М46.

✉ kovalchuk.2017@stud.nstu.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

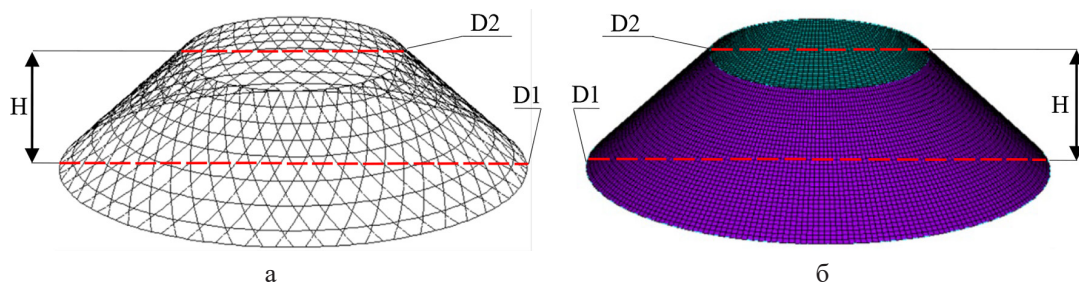


Рисунок 1. Рассматриваемые конструкции: а) – исходная конструкция; б) – сплошной адаптер

Таблица 1

Геометрические параметры

D 1, м	D 2, м	H, м
2.490	1.177	0.650

Таблица 2

Геометрические параметры семейств ребер

Ребра	Высота h, мм	Толщина b, мм	Кол-во, шт
Шпангоуты	30	18	2
Кольцевые	10	14	7
Спиральные	10	14	96

Таблица 3

Механические свойства материалов

Углепластик М46			Алюминий А1-2024		
E, Па	ρ , кг/м ³	ν	E, Па	ρ , кг/м ³	ν
1.8E 11	1650	0.19	0.7E 11	2770	0.33

Проводилось сравнение рассчитанных численно полей напряжений в сплошном и сетчатом адаптерах, а также значений критических нагрузок.

Сплошной адаптер усилен жесткими шпангоутами на верхней и нижней кромках. При моделировании адаптера использовалось два вида материалов: алюминий А1-2024 и углепластик М46. Геометрические параметры конструкций представлены в таблице 1. Геометрические параметры семейств ребер даны в таблице 2. Механические свойства материалов представлены в таблице 3.

Закрепление реализуется путем жесткой заделки на нижней кромке. В конструкциях к верхнему шпангоуту прикладывается осевая сжимающая нагрузка, равная 108 тс.

2. Расчет массы и толщины

Расчет массы исходной конструкции представлен в блок-схеме (рисунок 2). На первом этапе задаются постоянные параметры, такие как высота конструкции (H), радиусы верхнего (R1) и нижнего основания (R2) соответственно, геометрические параметры реберной структуры – толщина

(b) и высота (h), а также вычисляется длина ребер [3]. На следующем этапе рассчитывается объем каждого семейства ребер, а далее определяется их масса. Общая масса исходной конструкции составила 42.525 кг (рисунок 3).

Необходимо учитывать, что масса сплошных адаптеров должна быть равна массе исходной конструкции [4]. Толщины оболочек из углепластика и алюминия равны 3.7 мм и 1.7 мм соответственно.

3. Конечно-элементное моделирование конструкций в Ansys Mechanical APDL

Для моделирования конструкций сплошного и сетчатого адаптеров воспользуемся программным конечно-элементным комплексом ANSYS. Для моделирования параметрических дискретных моделей использовалась следующая блок-схема (рисунок 4).

Построение моделей проводилось в цилиндрической системе координат. На первом этапе задается блок точек с использованием команды K,, x, y, z, где x, y, z – координаты точек (рисунок 5а).



Рисунок 2. Блок-схема расчета массы

Длины

$$L_{sp} := 1.045 \cdot 48 \cdot 2 = 100.32 \text{ м.} \quad L_{shp} := 7.823 + 3.698 = 11.521 \text{ м.} \quad L_{kol} := 39.3312 \text{ м.}$$

Поперечные сечения

$$S_{sp} := 0.01 \cdot 0.014 = 1.4 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \quad S_{shp} := 0.03 \cdot 0.018 = 5.4 \times 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$S_{kol} := 0.01 \cdot 0.014 = 1.4 \times 10^{-4} \text{ м}^2$$

Объемы

$$V_{sp} := L_{sp} \cdot S_{sp} = 0.014 \text{ м}^3 \quad V_{shp} := L_{shp} \cdot S_{shp} = 6.221 \times 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_{kol} := L_{kol} \cdot S_{kol} = 5.506 \times 10^{-3} \text{ м}^3$$

Общий объем

$$V := V_{sp} + V_{shp} + V_{kol} = 0.026 \text{ м}^3$$

Общая масса

$$M := V \cdot 1650 = 42.525 \text{ кг.}$$

Рисунок 3. Расчет массы исходной оболочки в Mathcad15

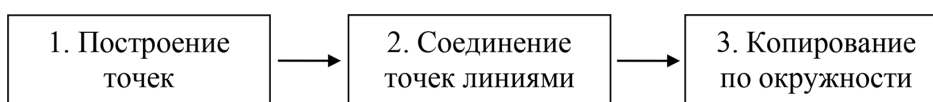


Рисунок 4. Блок-схема построения параметрических моделей

Для получения структурного элемента используются команды L, k1, k2 и A, k1, k2, k3, k4, точки соединяются линиями либо элементами площади с помощью команд. После полученный структурный элемент копируется по окружности командой LGEN [5] (рисунок 5в).

Для моделирования семейств ребер закладывался балочный элемент BEAM4 – двухузловой конечный элемент с шестью степенями свободы в каждом узле. При построении сплошной конструкции использовался оболочечный элемент SHELL181 – четырехузловой конечный элемент с шестью степенями свободы в каждом узле [6]. В качестве топологических связей, которые применяются для передачи нагрузки на конструкцию через мнимый узел, выступал абсолютно жесткий элемент MPC 184.

На рисунке 7 представлены конечно-элементные модели сетчатого и сплошного адаптеров, а также пронумерованные семейства конечных элементов. В сплошной конструкции под отметкой 1 обозначается балочный элемент, под отметкой 2 – оболочечный элемент, под отметкой 3 – жесткий элемент MPC 184. В сетчатой конструкции под отметками 1, 2, 3 обозначаются балочные элементы, под отметкой 4 – жесткий элемент.

4. Граничные условия

Сжимающая осевая нагрузка, равная 108 тс, приложена к мнимому узлу и передается равномерно на конструкцию (рисунок 8а, б). Нижний шпангоут фиксируется по всем степеням свободы (рисунок 8в, г).

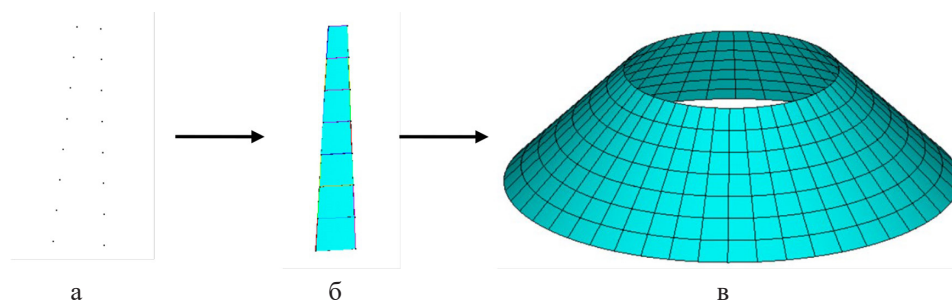


Рисунок 5. Построение параметрической модели сплошного адаптера: а) – создание точек; б) – структурный элемент; в) – полученная модель

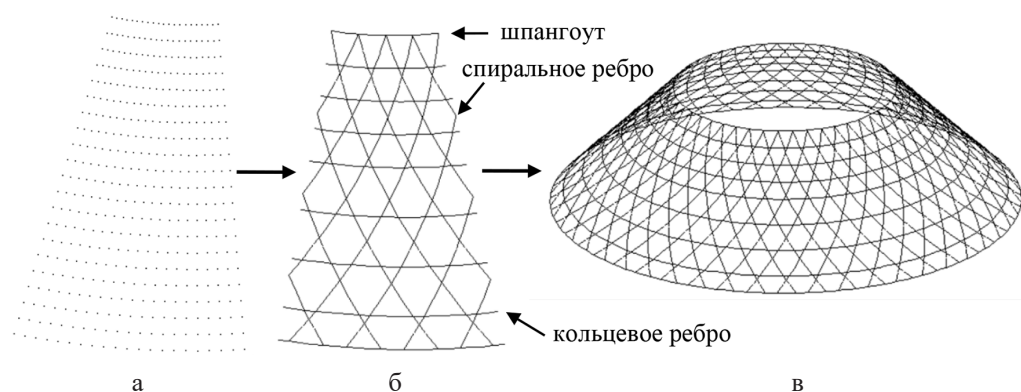


Рисунок 6. Построение параметрической модели сетчатого адаптера: а) – создание точек; б) – структурный элемент; в) – полученная модель

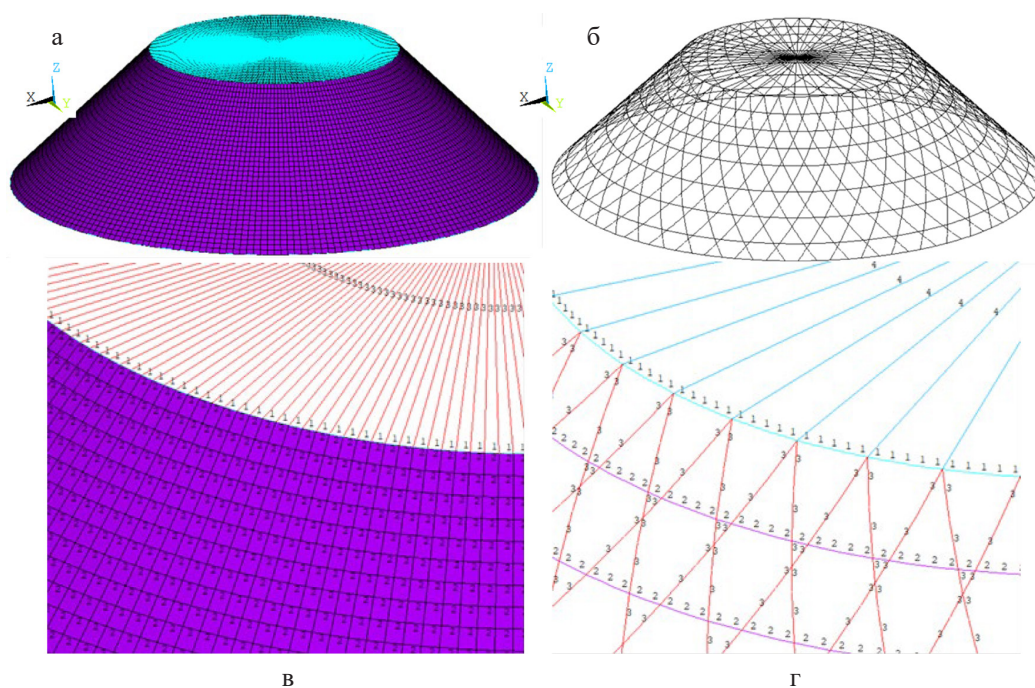


Рисунок 7. Конечно-элементная модель: а) – сплошного адаптера; б) – сетчатого адаптера; в) – нумерация конечных элементов сплошного адаптера; г) – нумерация конечных элементов сетчатого адаптера

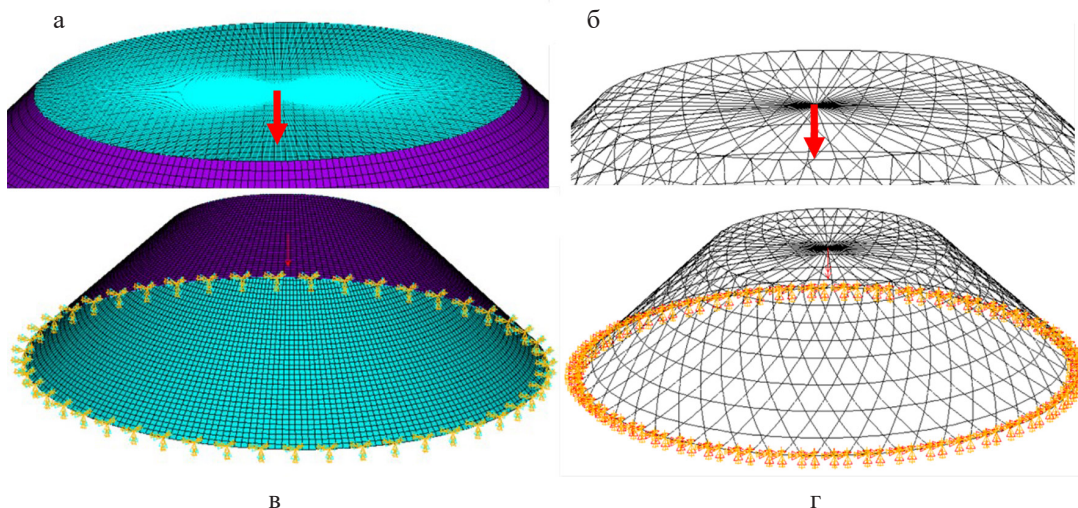


Рисунок 8. Граничные условия: а) – нагрузка сплошного адаптера; б) – нагрузка сетчатого адаптера; в) – закрепление сплошного адаптера; г) – закрепление сетчатого адаптера

5. Напряженно-деформированное состояние сплошных оболочек

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние сплошной оболочки из углепластика, возникающее в результате приложенной осевой сжимающей силы, равной 108 тс (рисунок 9).

Абсолютные значения максимальных сжимающих напряжений равны 128 МПа.

На рисунке 10 представлены поля перемещений в адаптере из углепластика под нагрузкой.

Значение максимального перемещения конструкции из углепластика равно 0.57 мм.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние алюминиевого адаптера, возникающее от приложенной осевой сжимающей силы, равной 108 тс (рисунок 11).

Максимальное значение напряжений по Мизесу равно 269 МПа.

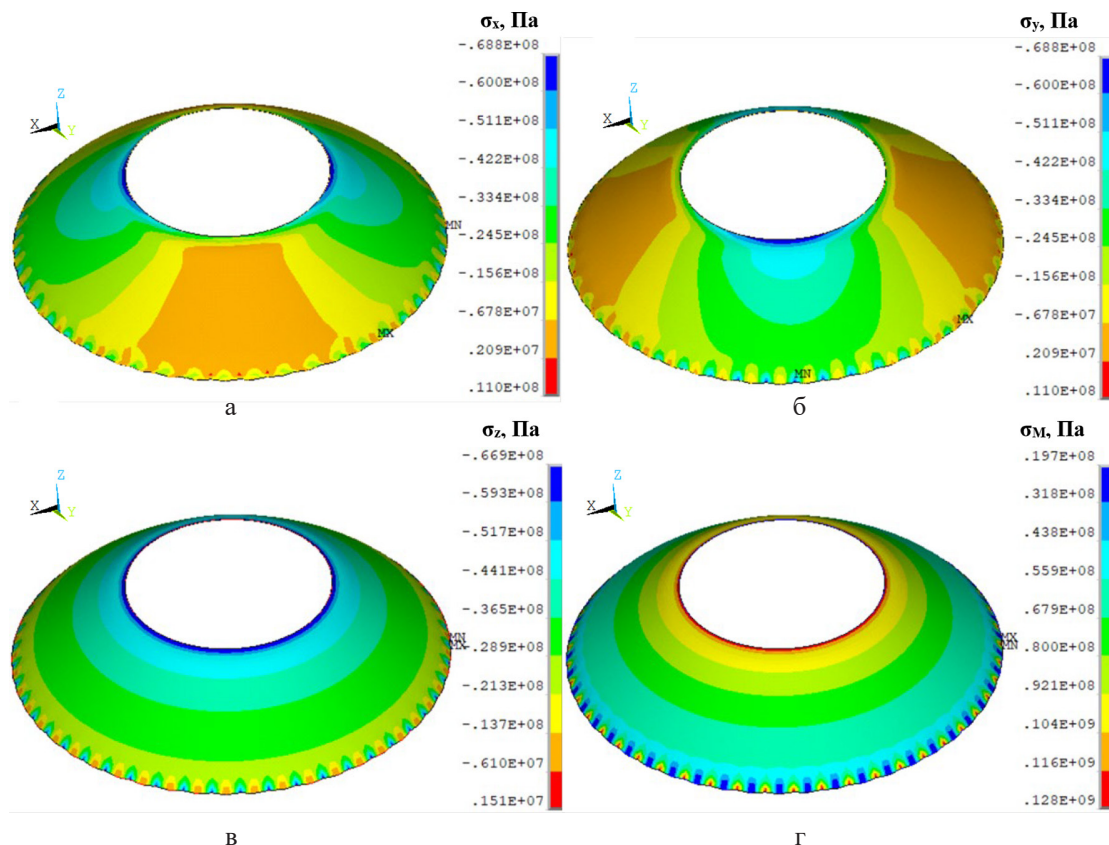


Рисунок 9. Поля напряжений в адаптере из углепластика: а) – напряжения в направлении оси X; б) – напряжения в направлении оси Y; в) – напряжения в направлении оси Z; г) – напряжение по Мизесу

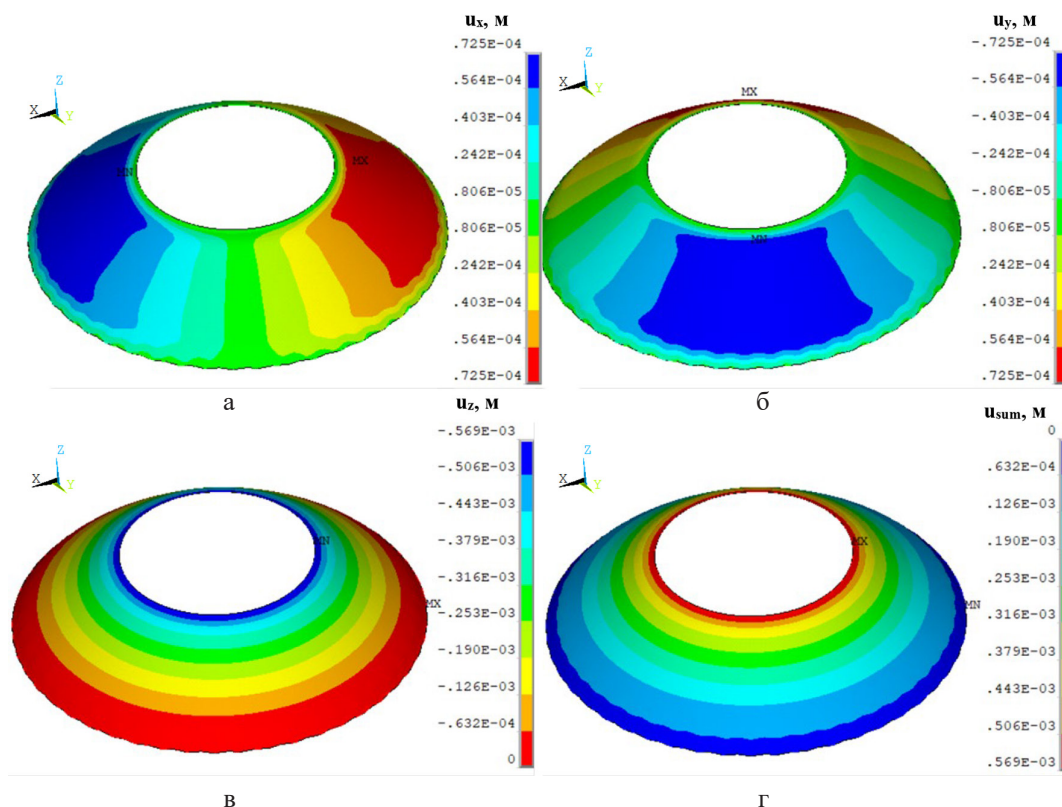


Рисунок 10. Поля перемещений в адаптере из углепластика: а) – перемещения в направлении оси X; б) – перемещения в направлении оси Y; в) – перемещения в направлении оси Z; г) – суммированные перемещения

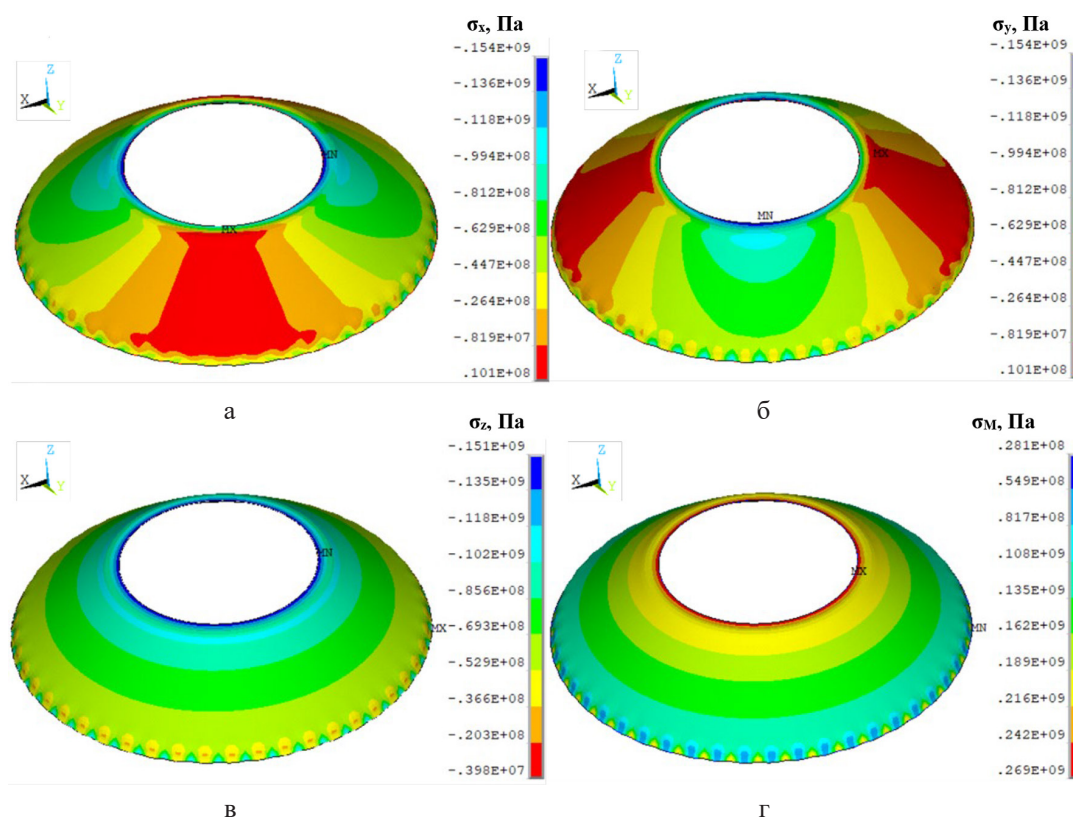


Рисунок 11. Поля напряжений в сплошном адаптере из алюминия: а) – напряжений в направлении оси X; б) – напряжений в направлении оси Y; в) – напряжений в направлении оси Z; г) – напряжения по Мизесу

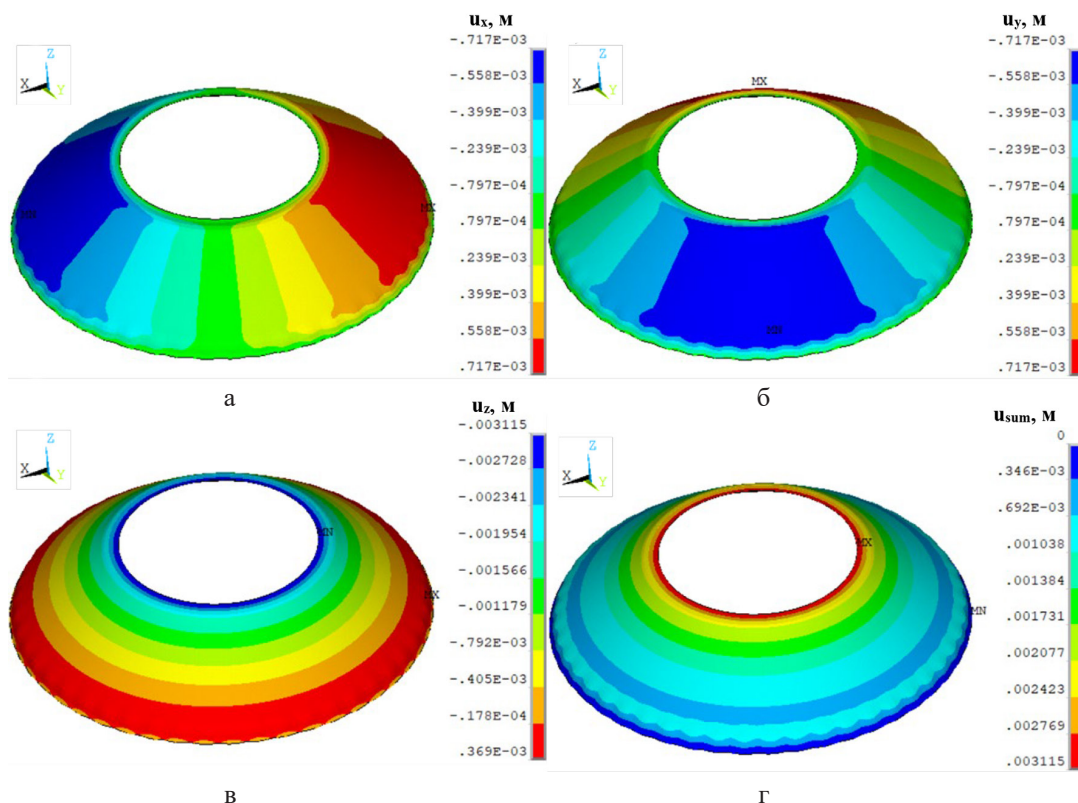


Рисунок 12. Поля перемещений алюминиевого адаптера: а) – перемещения в направлении оси X; б) – перемещения в направлении оси Y; в) – перемещения в направлении оси Z; г) – суммированные перемещения

Перемещения сплошной оболочки из алюминия представлены на рисунке 12.

Значения максимальных перемещений сплошного адаптера из алюминия равны 3.12 мм.

Анализ полей напряжений показал, что максимальные напряжения по Мизесу в сплошном адаптере из углепластика меньше в 2.1 раза, чем в адаптере из алюминия. Сплошные адаптеры из алюминия и углепластика не достигают предельных значений максимальных напряжений.

Допускаемые напряжения при сжатии у материалов составляют не менее 1000 МПа для углепластика и 470 МПа для алюминия [7].

6. Устойчивость сплошных оболочек

Для определения значений критической нагрузки проведем анализ устойчивости оболочек из углепластика [8] и алюминия в конечно-элементном комплексе ANSYS.

На рисунке 13 представлены первые формы потери устойчивости моделей.

Критическая нагрузка для конструкции из углепластика составила 4.63 МН, а для конструкции из алюминия – 0.4 МН. Анализ форм потери устойчивости адаптеров из углепластика и алюминия показал, что оболочки деформируются осесимметрично, волнообразно. Выпучивание

конструкции наблюдается в средней по высоте части конструкции и локализуется в зоне нижнего шпангоута конструкций.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние конструкций при критической нагрузке (рисунок 14).

Абсолютное максимальное значение напряжения в адаптере из углепластика составило 559 МПа, в алюминиевом – 102 МПа.

Максимальные значения суммарных перемещений для адаптеров из углепластика и алюминия составили 2.48 мм и 1.18 мм соответственно.

7. Напряженно-деформированное состояние сетчатой оболочки

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние сетчатой конструкции, возникающее от сжимающей осевой нагрузки в 108 тс (рисунок 15).

Абсолютное значение максимального сжимающего напряжения в спиральных ребрах сетчатого адаптера составило 132 МПа. В кольцевых ребрах максимальное значение растягивающих напряжений равно 55.2 МПа. При сжимающей нагрузке спиральные ребра работают на сжатие, а кольцевые на растяжение [9]. Значения максимальных напряжений не превышают допустимых.

Поля перемещений сетчатого адаптера представлены на рисунке 16.

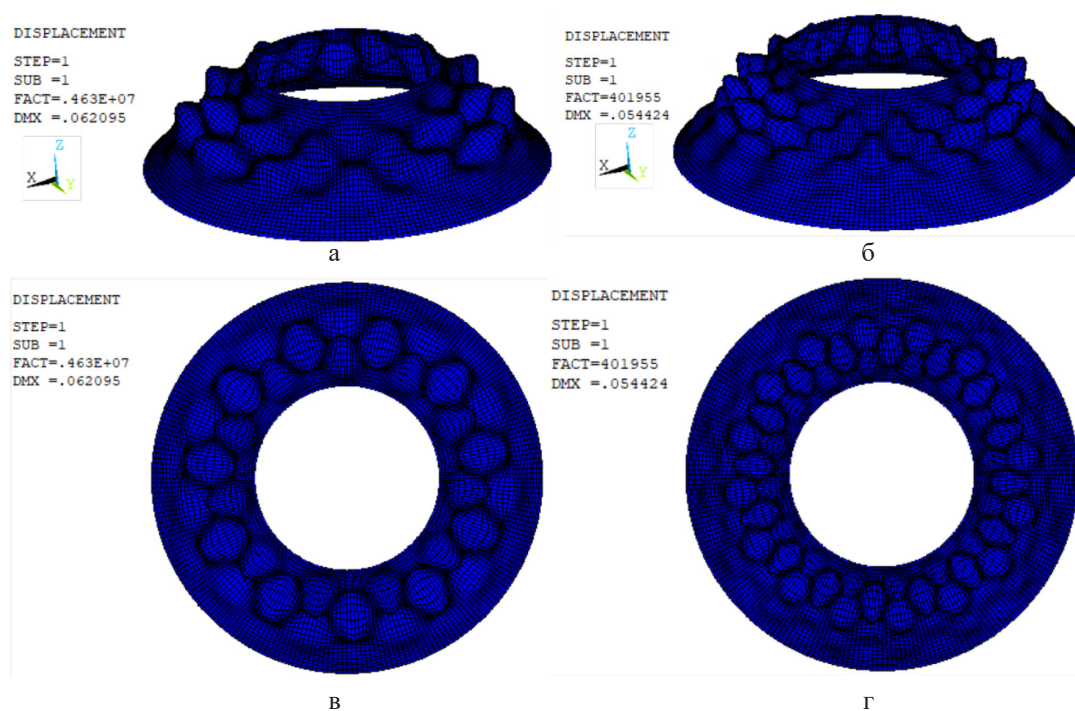


Рисунок 13. Первые формы потери устойчивости адаптеров: а) – из углепластика (вид сбоку); б) – из алюминия (вид сбоку); в) – из углепластика (вид сверху); г) – из алюминия (вид сверху)

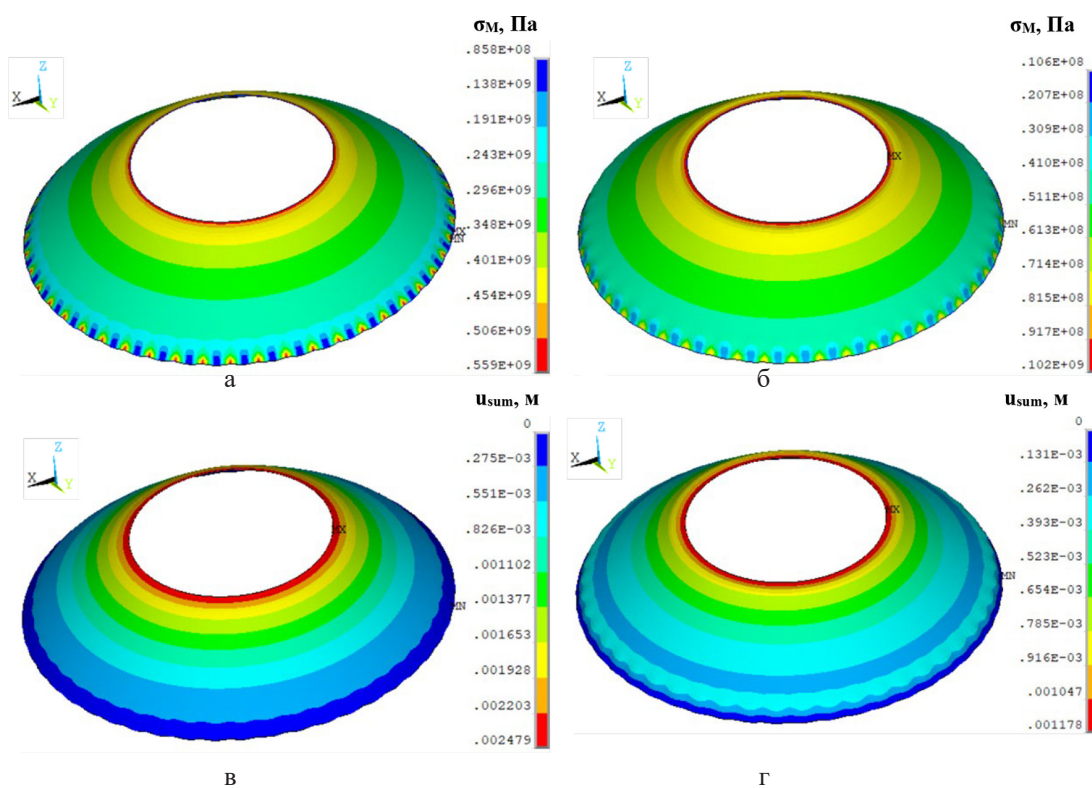


Рисунок 14. Поля напряжений по Мизесу и поля перемещений: а) – напряжения в адаптере из углепластика; б) – напряжения в адаптере из алюминия; в) – перемещения в адаптере из углепластика; г) – перемещения в адаптере из алюминия

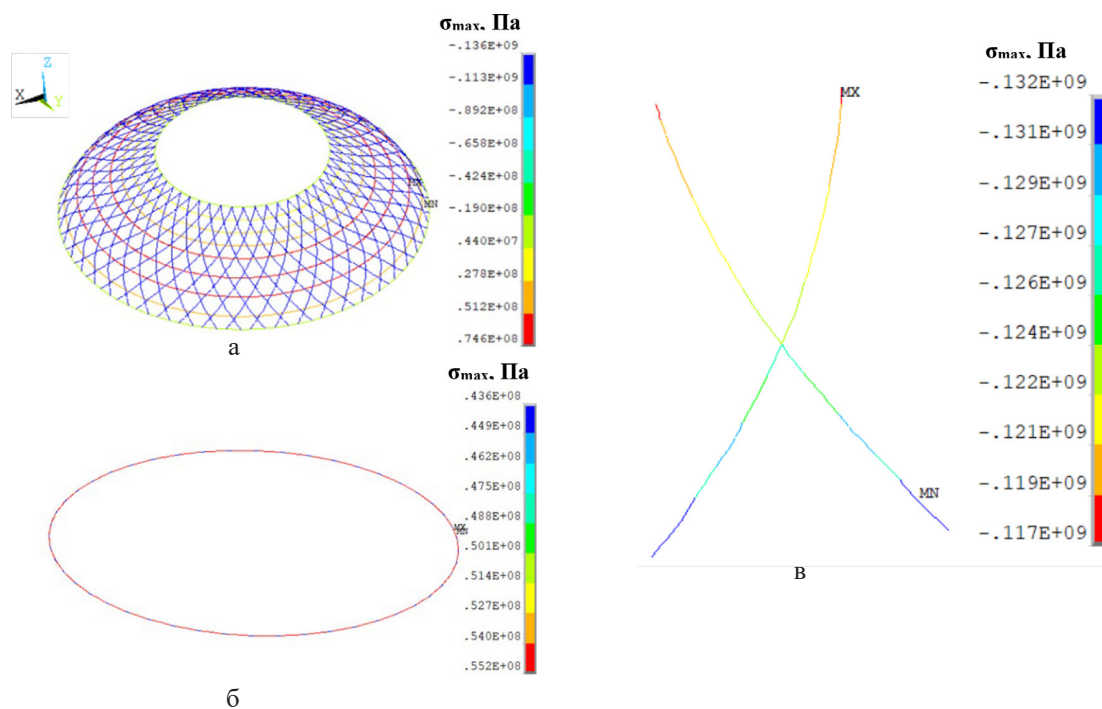


Рисунок 15. Поля напряжений: а) – в исходном адаптере; б) – в кольцевом ребре; в) – в паре спиральных ребер

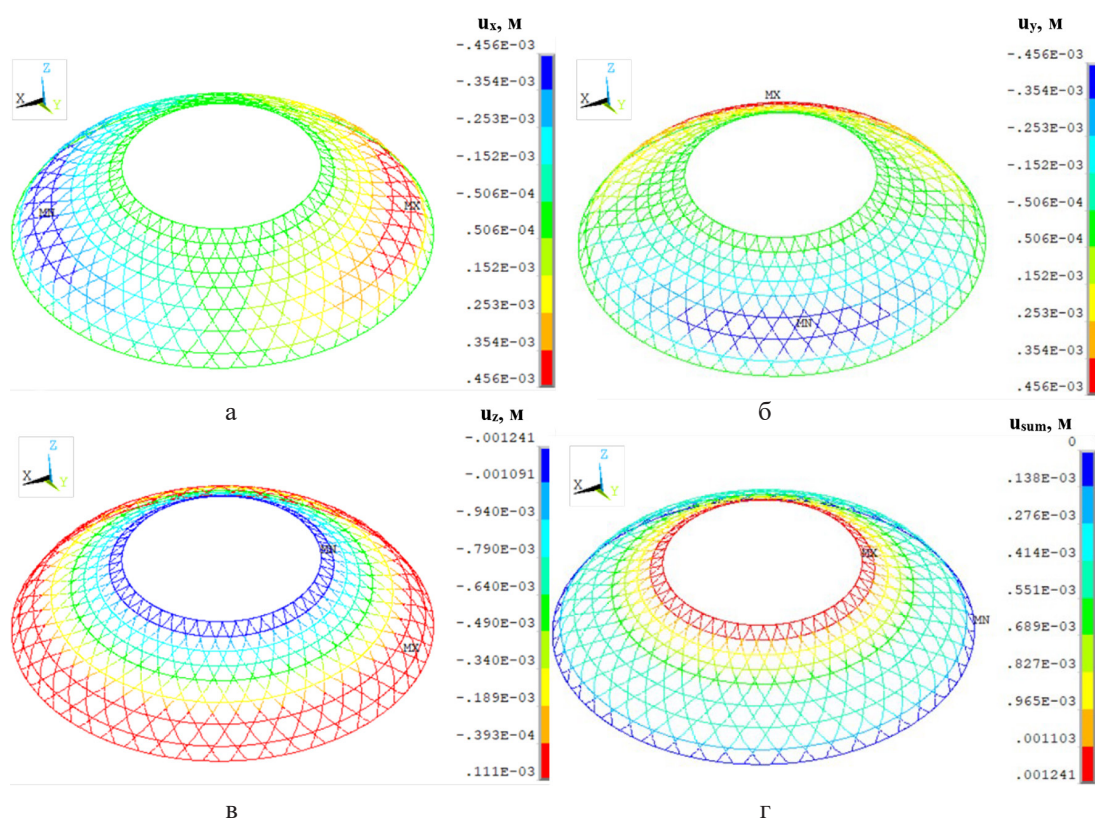


Рисунок 16. Поля перемещений в сетчатом адаптере: а) – в направлении оси X; б) – в направлении оси Y; в) – в направлении оси Z; г) – суммарные перемещения

Значение максимального перемещения сетчатого адаптера составило 1.24 мм.

8. Устойчивость сетчатой оболочки

Для определения критической нагрузки проведем анализ устойчивости исходной сетчатой конструкции (см. рисунок 1а) и рассмотрим первую форму потери устойчивости (рисунок 17).

Заключение

В результате проведенного исследования были сформулированы следующие выводы.

1. Масса исходной сетчатой конструкции составила 42.525 кг. Данная масса фиксировалась для сплошных адаптеров. При фиксированной массе были вычислены значения толщин сплошных оболочек из углепластика и алюминия, которые равны соответственно 3.7 и 1.7 мм.

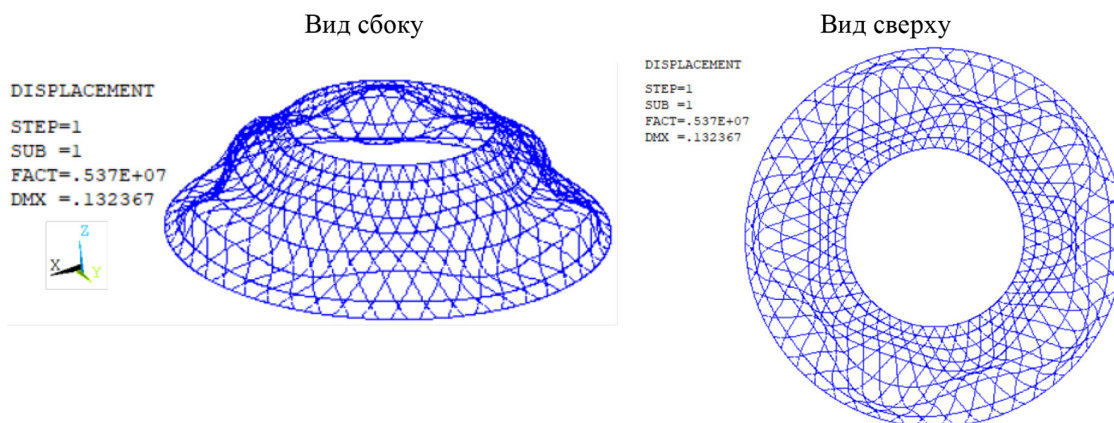


Рисунок 17. Первая форма потери устойчивости исходного сетчатого адаптера

Критическая нагрузка сетчатой оболочки составила 5.37 МН. Форма потери устойчивости симметрична. Смятие ребер происходит по среднему поясу конструкции и локализуется к нижнему шпангоуту.

Рассмотрим поля напряжений и перемещений при приложении критической нагрузки, равной 5.37 МН (рисунок 18).

2. В ходе моделирования адаптеров были выбраны конечные элементы для численных моделей. В конечно-элементном комплексе ANSYS построены модели сетчатого и сплошных адаптеров.

3. Рассчитывались поля напряжений и перемещений сплошных адаптеров от осевой сжимающей силы в 108 тс. Модели были закреплены заделкой по основанию нижнего шпангоута. Анализ

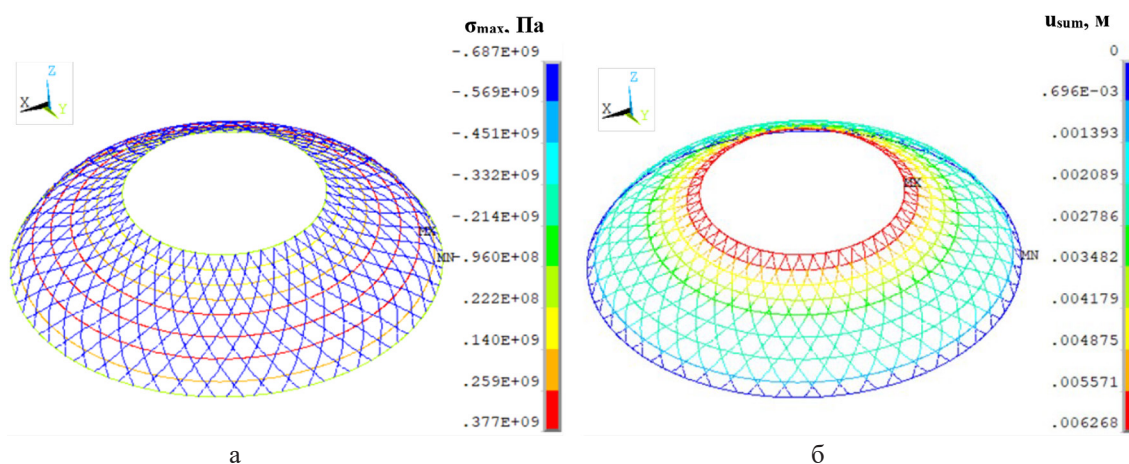


Рисунок 18. Поля напряжений и суммарных перемещений сетчатой конструкции: а) – максимальные напряжения от критической силы; б) – перемещения от критической силы

Абсолютное значение максимального сжимающего напряжения при критической нагрузке составило 637 МПа, а растягивающее – 377 МПа. Максимальное значение суммарного перемещения равно 6.27 мм.

Полей напряжений показал, что максимальные напряжения по Мизесу для адаптера из углепластика в 2.1 раза меньше, чем у конструкции из алюминия и равны соответственно 128 и 269 МПа. Максимальное суммарное перемещение для адап-

тера из углепластика равно 0.57 мм, а для конструкции из алюминия – 3.12 мм. Максимальные напряжения для адаптеров не превышают допустимых.

4. Анализ устойчивости сплошных конструкций показал, что критическая нагрузка для адаптера из углепластика в 10 раз больше, чем у конструкции из алюминия. Значения критических нагрузок равны 4.63 и 0.4 МН соответственно. Поля напряжений и перемещений в конструкциях рассчитывались при вычисленной критической нагрузке потери устойчивости. Анализ полей напряжений показал, что сплошные оболочки работают на сжатие. Адаптер из углепластика работает на сжатие эффективнее, чем конструкция из алюминия. Максимальные напряжения от действия критической нагрузки не превышают допустимых напряжений. Таким образом, можно сделать вывод, что адаптеры теряют устойчивость до разрушения.

5. Спиральные ребра сетчатого адаптера при осевом нагружении работают на сжатие, а коль-

цевые ребра на растяжение. Абсолютные значения максимальных напряжений при сжатии составили 132 МПа, а на растяжение – 55.2 МПа. Максимальные напряжения не превышают допустимых значений. Максимальные перемещения равны 1.24 мм.

6. Расчет устойчивости сетчатого адаптера показал, что критическая нагрузка составляет 5.37 МН. Напряжения в конструкции не превышают допустимых значений. Критическая сила для сетчатого адаптера в 1.16 раза больше, чем для сплошного композитного адаптера. Таким образом, на осевое сжатие с учетом устойчивости и напряженного состояния эффективнее работает сетчатый адаптер из композитного материала – углепластика.

Дальнейшее развитие работы заключается в исследовании напряженно-деформированного состояния и устойчивости адаптера из углепластика при изменении сетчатой структуры и фиксированной массе.

Список литературы

- [1] Хахленкова А. А., Лопатин А. В. Обзор конструкций адаптеров современных космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2018. № 3 (25). С. 134–146.
- [2] Васильев В. В., Разин А. Ф., Азаров А. В. Композиционные сетчатые конструкции – проектирование, расчет и изготовление. М.: Инновационное машиностроение, 2023. 488 с.: ил.
- [3] Ковальчук Л. М. Подход к рациональному проектированию реберной структуры сетчатой оболочки без обшивки с учетом ее массы и приложенной нагрузки / Л. М. Ковальчук; науч. рук. Т. В. Бурнышева. – Текст: электронный // Россия молодая: сб. материалов 13 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20–23 апр. 2021 г. Кемерово: ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», 2021. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2021/RM21/pages/Articles/042101.pdf> (дата обращения: 28.01.2022). ISBN 978-5-00137-232-5.
- [4] Бурнышева Т. В. Применение методологии вычислительного эксперимента в задачах проектирования и диагностики анизотропных конструкций космических летательных аппаратов // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 98–102.
- [5] Ковальчук Л. М., Бурнышева Т. В. О подходах к построению параметрической дискретной модели сетчатой цилиндрической оболочки в конечно-элементном пакете ANSYS. Текст: электронный // Краевые задачи и математическое моделирование: тематический сборник научных статей. Новокузнецк: Изд-во КГПИ КемГУ, 2023. С. 52–57. 8 CD-ROMs. – Загл. с экрана.
- [6] Хахленкова А. А., Шатов А. В. Геометрическое и конечно-элементное моделирование сетчатой конической оболочки с геодезической траекторией спиральных ребер // Сибирский аэрокосмический журнал. 2016. Т. 17. № 2. С. 372–376.
- [7] Totaro G. Flexural, torsional, and axial global stiffness properties of anisogrid lattice conical shells in composite material // Composite Structures. 2018. № 184, pp. 540–551.
- [8] Бурнышева Т. В., Кравцова Ю. А. Решение задачи устойчивости сетчатых оболочек из композиционных материалов при статическом нагружении [Текст] // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 1. С. 101–105.
- [9] Ковальчук Л. М., Бурнышева Т. В. Анализ напряженно-деформированного состояния трансформируемой конструкции при осевом сжатии и кручении / науч. рук. Т. В. Бурнышева. Текст: непосредственный // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов 17 Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 4–8 дек. 2023 г.: в 11 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2024. Ч. 10. С. 34–38. 100 экз. ISBN 978-5-7782-5138-0.
- [10] Исследование изогридной и сплошной конструкций на напряженно-деформированное состояние и устойчивость = Stress – strain and stability test of isogrid and solid structures / Д. Д. Козырев, Т. В. Гульков, Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. Текст: электронный // Решетневские чтения: материалы XXVIII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-

космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева, Красноярск, 18–22 ноября 2024 г.: в 2 ч. Красноярск: Изд-во СибГУ, 2024. Ч. 1. С. 80–82. – Режим доступа: <https://reshetnev.sibgau.ru/page/materialy-konferentsii>. – Загл. с экрана.

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE AND STABILITY OF SOLID AND MESH ADAPTERS

T. V. Gulkov, L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva

*Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation*

The aim of the study is to compare the stress fields and stability of adapters of various configurations made of aluminum Al – 2024 and composite M46. The adapters have a constant mass. The solid and mesh adapters were reinforced with rigid frames along the edges of the structures, the lower edges were fixed with rigid sealing. Parametric discrete models were modeled using the ANSYS finite element software package. A two-node beam end element with six degrees of freedom BEAM4 was used for the mesh adapter. A four-node, six-degree-of-freedom terminal element SHELL181 was inserted into the solid adapter. The load on the structure was transferred using topological connections with an imaginary node located in the center of the upper frame. Topological connections were modeled by a rigid MPC 184 element. An axial compressive load of 108 t.s. was applied to the imaginary node. Analysis of the stress-strain state of the continuous adapters showed that the adapter made of carbon fiber holds the load better than aluminum. The values of the critical load of the stability loss of the aluminum adapter are less than the values of the critical load of the carbon fiber adapter. The analysis of stress and displacement fields has shown that in the mesh adapter, the spiral fins work for compression, and the annular fins work for tension. A comparison of the stress fields of the mesh and solid adapters, as well as the values of critical loads, allows us to conclude that it is more efficient to use a mesh structure in the product.

Keywords: stress-strain state, stability, adapter, ANSYS, distribution fields, critical load.

Submitted: 12.02.2025. Accepted: 09.09.2025.

References

- [1] Khakhlenkova A. A., Lopatin A. V. Overview of adapter designs of modern spacecraft // Spacecraft and technologies. 2018. № 3 (25), pp. 134–146.
- [2] Vasiliev V. V., Razin A. F., Azarov A. V. Composite mesh structures – design, calculation and manufacture. Moscow: Innovative Engineering, 2023. 488 p.: ill.
- [3] Kovalchuk L. M. An approach to the rational design of the rib structure of a mesh shell without cladding, taking into account its mass and applied load / L. M. Kovalchuk; scientific supervisor T. V. Burnysheva. – Text: electronic // Young Russia: collection of materials of the 13th All-Russian Scientific and Practical Conference with international Moscow, Kemerovo, April 20–23, 2021. Kemerovo: Kuzbass State Technical University T. F. Gorbachev University", 2021. – URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2021/RM21/pages/Articles/042101.pdf> (accessed: 01/28/2022). – ISBN 978-5-00137-232-5.
- [4] Burnysheva T. V. Application of computational experiment methodology in the problems of designing and diagnosing anisogrid structures of spacecraft // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2014. № 6, pp. 98–102.

- [5] Kovalchuk L. M., Burnysheva T. V. On approaches to constructing a parametric discrete model of a cylindrical mesh shell in the finite element package ANSYS. – Text: electronic // Boundary value problems and mathematical modeling: themat. collection of scientific articles. Novokuznetsk: Publishing house of KGPI KemGU, 2023, pp. 52–57. 8 CD-ROMs. Caption from the screen.
- [6] Khakhlenkova A. A., Shatov A. V. Geometric and finite element modeling of a reticulated conical shell with a geodesic trajectory of spiral ribs // Siberian Aerospace Journal, 2016. Vol. 17, № 2, pp. 372–376.
- [7] Totaro G. Flexural, torsional, and axial global stiffness properties of anisogrid lattice conical shells in composite material // Composite Structures. 2018. № 184, pp. 540–551.
- [8] Burnysheva T. V., Kravtsova Yu. A. Solving the problem of stability of mesh shells made of composite materials under static loading [Text] // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. 2012. № 1, pp. 101–105.
- [9] Kovalchuk L. M., Burnysheva T. V. Analysis of the stress-strain state of a transformed structure under axial compression and torsion / scientific direction of T. V. Burnysheva. Text: direct // Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers 17 of the All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Novosibirsk, December 4–8, 2023: at 11 a.m. – Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2024. Part 10, pp. 34–38. 100 copies – ISBN 978-5-7782-5138-0.
- [10] Study of isogrid and solid structures for stress – strain state and stability = Stress – strain and stability test of isogrid and solid structures / D. D. Kozyrev, T. V. Gulkov, L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva – Text: electronic // Reshetnev readings: proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference, dedicated to To the 100th anniversary of the birth of the General Designer of Rocket and Space Systems, Academician Mikhail Fedorovich Reshetnev, Krasnoyarsk, November 18–22, 2024: at 2 a.m. – Krasnoyarsk: Publishing House of SibGU, 2024. Part 1, pp. 80–82. Access mode: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii>. – Cover from the screen.

Сведения об авторах

Гульков Тимофей Владимирович – магистрант НГТУ. Окончил факультет летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета в 2025 году. Область научных интересов: космическая и авиационная техника, численное моделирование, расчеты конструкций на прочность.

Ковальчук Лидия Максимовна – ассистент, лаборант кафедры «Прочность летательных аппаратов» НГТУ. Окончила факультет летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета в 2023 году. Область научных интересов: космическая и авиационная техника, механика деформируемого твёрдого тела.

Бурнышева Татьяна Витальевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прочность летательных аппаратов» Новосибирского государственного технического университета. Окончила математический факультет Кемеровского государственного университета в 1995 году. Область научных интересов: космическая и авиационная техника, механика деформируемого твёрдого тела, численное моделирование, математическое моделирование, расчеты конструкций на прочность.